光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.06.025

螺旋布设光纤光栅的软体操作器形状传感方法

朱伟涛[1]，孙广开[1,2*]，何彦霖[1]，孟凡勇[1]

（北京信息科技大学 1. 北京市光电测试技术重点实验室；2. 光电测试技术及仪器教育部重点实验室，北京 100192）

摘　要： 为实现微创手术软体操作器弯曲伸缩运动时的形状测量，提出一种螺旋布设光纤光栅形状传感方法。不同于传统的直线形布设方法，螺旋形布设方法可以防止软体操作器弯曲伸缩运动时，光纤光栅的折断、脱胶现象发生。理论分析了螺旋布设光纤光栅的传感原理及弯曲变形的重构算法；制备了光纤光栅沿螺旋形布设在软体操作器表面的试样；搭建了软体操作器弯曲变形的实验系统；实验分析了软体操作器在不同弯曲状态下，螺旋布设光纤光栅中心波长漂移量与弯曲角度间的变化规律，并重构出软体操作器的变形形状。实验结果表明：螺旋布设光纤光栅在软体操作器中不同位置的灵敏度最大为7.1 pm/(°)，软体操作器弯曲角度实际测量值与理论重构值间的最大误差不足4.29%。螺旋形光纤传感方法可用于软体操作器形状传感与重构。

关键词： 软体操作器；螺旋布设；光纤光栅；形状传感

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2020)06－0889－07

Shape Sensing Method of Soft Manipulator Based on Fiber Grating with Spiral Layout

ZHU Weitao[1], SUN Guangkai[1,2], HE Yanlin[1], MENG Fanyong[1]

(1. Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Measurement Technology; 2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, CHN)

Abstract: In order to measure the shape of a minimally invasive surgical soft manipulator when it is flexing and stretching, a shape sensing method based on spirally arranged fiber grating is proposed. Unlike the traditional linear layout method, the spiral layout method can prevent the fiber grating from breaking and degumming when the soft manipulator flexes. The sensing principal of spirally arranged fiber grating and the reconstruction algorithm of bending deformation are analyzed theoretically. The sample of fiber grating placed on the surface of the soft manipulator along the spiral is prepared, and the experimental system for bending deformation of the soft manipulator is established. The variation of the center wavelength drift and bending angle of spirally arranged fiber grating under different bending conditions is analyzed experimentally, and the deformation shape of the soft manipulator is reconstructed. The experimental results show that the maximum sensitivity of the spirally arranged fiber grating in different positions of the soft manipulator is 7.1 pm/(°), and the maximum error between the actual measured value of the bending angle of the soft manipulator and the theoretical reconstruction value is less than 4.29. The helical optical fiber sensing method can be used for the shape sensing and reconstruction of soft manipulators.

Key words: soft manipulator; spiral layout; fiber grating; shape sensing

收稿日期：2020－08－12.

基金项目：国家自然科学基金项目(61903041)；高等学校学科创新引智计划项目(D17021).

* **通信作者：**孙广开

E-mail: guangkai.sun@buaa.edu.cn

0 引言

软体机器人是指由软体材料和柔顺、灵活、兼容的驱动方式构成，能够在非结构化的环境中更安全地交互，并处理不确定的、动态的任务，实现对未知对象的抓取和操作等动作的机器人[1]。与传统的刚性机器人不同，软体机器人可以通过简单的控制方法主动和被动地改变其形状，从而实现安全、稳健和有效的交互。同时，因其固有的合规性，易于制造和实现的特点、简单的输入和复杂的输出，使软体机器人很受欢迎[2]。基于上述特点，软体机器人在复杂、不可预测、具有挑战性的环境中具有很大的应用潜力，如医学、工业、救援及灾难应对等[3]。

目前，软体机器人形状变形的测量方法主要包括：条纹投影测量法[4]、传感贴片测量法[5]、视觉测量方法[6]等。相较于常规的测量方法，光纤传感测量方法有明显的特点和优势：1）光纤光栅结构简单、体积小、易加工、成本低、灵敏度高，更适用于软体机器人传感领域；2）柔性、灵活性，光纤光栅的形状可以随意改变，适用于软体机器人形状变形的测量；3）光纤光栅易于波分复用，从而易于实现多点传感测量[7-9]。

国内外学者在光纤形状传感方面已经开展了一定的研究工作。Noh 等[10]设计了柔性机械手三轴力传感器，采用环形中空结构允许机械手各臂段之间的光纤连接，在流体腔室的周围布设光纤光栅，易于实现柔性机械手的弯曲变形传感。该方法主要针对刚性结构的形状监测，不适用于软体材料形状传感方面的研究。Ge 等[11]提出一种基于偏心嵌入式光纤光栅的双向软硅曲率传感器，能够区分弯曲曲率和弯曲方向。双向软硅曲率传感器的灵敏度高达 1.64 pm/m^{-1}，其曲率测量范围最大为 ± 80 m^{-1}。Duncan 等[12]利用光纤光栅传感阵列，建立了能够重构三维形状的测量系统，其测量误差不大于 1.2%。曲道明等[13]根据贴敷在机翼表面的柔性蒙皮中光纤光栅传感器测量的曲率信息，重构出机翼的三维形状，其柔性蒙皮样品灵敏度为 28.7 pm/m^{-1}，测量曲率范围不小于 25 m^{-1}。钱晋武等[14]利用光纤光栅阵列组成应变测量传感器，根据采集的中心波长漂移量、应变信息，实现渐进式内窥镜变形形状的监测与重建。娄小平等[15]利用光纤光栅传感阵列构建传感器网络，提出了具有温度补偿功能的非正交光纤布拉格光栅（Fiber Bragg Grating，FBG）的柔杆空间形状传感测量方法。2018 年本课题组的高东等[16]提出了植入式光纤光栅的柔性传感方法，将光纤光栅沿直线植入软体操作器中，利用 3 次样条插值等算法实现了软体操作器的变形形状重建。但该布设方法的光纤光栅不适宜承受较大的弯曲伸缩运动，且易出现折断、脱胶现象。

基于以上存在的问题，本文提出了一种螺旋布设光纤光栅的软体操作器形状传感方法，并验证其可行性。在软体操作器模型表面以螺旋方式布设光纤光栅，分析并验证光纤光栅的反射光谱特征及其变化规律，并根据软体操作器在不同弯曲角度下的波长漂移量与曲率信息，重构出其三维形状。

1 螺旋布设光纤光栅传感重构算法

1.1 弯曲变形传感模型

所采用的传感器为 FBG 传感器，根据模式耦合理论，当宽带光在 FBG 中传输时，满足布拉格波长条件的光被反射，反射光的中心波长 λ_B 满足如下公式：

$$\lambda_B = 2n_{eff} \cdot \Lambda \tag{1}$$

式中，λ_B 为布拉格光栅的中心波长，n_{eff} 为光纤的有效折射率，Λ 为光栅周期。当光纤光栅所处环境中的应变、温度发生变化时，光纤光栅的有效折射率 n_{eff} 和光栅周期 Λ 也会改变，从而导致 FBG 的中心波长 λ_B 发生变化。关系式对应如下：

$$\lambda_B = 2n_{eff} \cdot \Lambda = 2n_{eff}(\varepsilon, T) \cdot \Lambda(\varepsilon, T) \tag{2}$$

在忽略温度变化的影响下，FBG 波长漂移只受应变的影响。FBG 在拉伸或压缩作用下，即只受轴向应变 ε 时，光栅周期 Λ 随之发生变化，有效折射率 n_{eff} 受轴向应变 ε 的影响较小，此时中心波长 λ_B 会产生漂移，偏移量为 $\Delta\lambda_B$，可以用如下关系式表示：

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_\varepsilon)\varepsilon \tag{3}$$

式中，P_ε 为光纤的有效弹光系数，约为 0.216，$\Delta\lambda_B$ 为光纤光栅中心波长漂移量。

本文提出了一种螺旋布设 FBG 的方法，将光纤沿着一定倾角，并以螺旋缠绕的方式布设在软体操作器的表面，在忽略扭转的情况下，其弯曲变形传感模型如图 1 所示，软体操作器模型上红色标出的 4 个部分为螺旋布设的 FBG 传感器。

假设软体操作器模型的初始长度为 H，底面半径为 r，光纤的缠绕圈数为 n，则将光纤展开，可以得到一个直角三角形，其底边为 $n2\pi r$，高为 H，设

光纤的总长度为 L，则由勾股定理可以得：

$$L=\sqrt{(n2\pi r)^2+H^2} \tag{4}$$

软体操作器发生弯曲变形时，认为各点的曲率变化一致，其底端固定，力作用点在其顶端。高度方向的变化量为 h，光纤展开后的倾斜角为 θ_1，则光纤变化后的长度 L_ε 可以表示为

$$L_\varepsilon=\frac{H-h}{\sin\theta_1} \tag{5}$$

高边的长度 $L_{DE}=H-h$，可以由弯曲角度 θ 来计算，公式为

$$\frac{H-h}{\sin\theta}\cdot\frac{\pi\theta}{180}=H \tag{6}$$

即：

$$H-h=\frac{180H\sin\theta}{\pi\theta} \tag{7}$$

联立并整理式(5)和(7)，可以得出光纤栅区受到的应变与弯曲角度之间的关系为

$$\varepsilon=\frac{L_\varepsilon-L}{L}=\frac{\dfrac{180H\sin\theta}{\pi\theta\sin\theta_1}-L}{L} \tag{8}$$

即：

$$\varepsilon=\frac{180H\sin\theta}{L\pi\theta\sin\theta_1}-1 \tag{9}$$

从式(9)可以得出，光纤的应变与光纤的长度、试样的长度、光纤展开后的倾斜角和弯曲角度有关。而由式(3)可知，FBG 传感器的中心波长漂移量与应变之间成线性关系，那么则有：

$$\Delta\lambda\propto\frac{180H\sin\theta}{L\pi\theta\sin\theta_1}-1 \tag{10}$$

由式(10)分析可知，在一定的角度范围内，螺旋布设 FBG 传感器的中心波长漂移量与弯曲角度呈正增长关系，且随着弯曲角度的增大，螺旋布设 FBG 传感器的中心波长漂移量也逐渐增大。

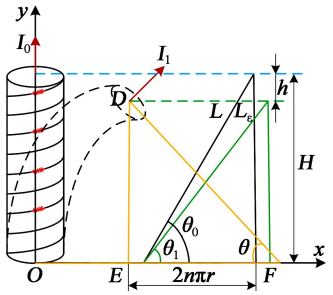


图 1　螺旋布设光纤光栅传感原理

1.2　弯曲变形重构算法

重构算法是依据 FBG 对空间曲率的传感测量，并建立弯曲变形重构的数学模型。在该模型中，得到的曲率值可以用于计算测量点的坐标，通过插值运算，由多个点可以拟合成一条曲线[17]。弯曲变形重构原理如图 2 所示。

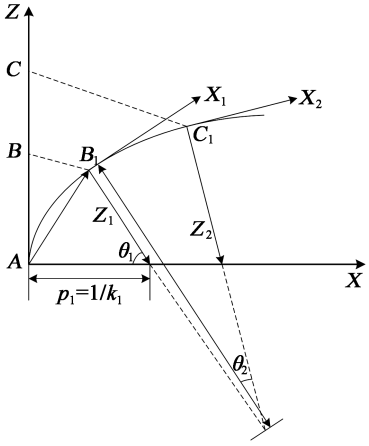


图 2　弯曲变形重构原理示意图

如图 2，建立 XAZ 运动坐标系，Z 轴方向为初始方向，软体操作器原始状态用直线 AC 表示。假设软体操作器弯曲变形后，沿曲线 AB_1C_1 的方向以自由的姿态进行弯曲，点 B_1，C_1 分别由点 B，C 平移旋转得到。根据微分学的概念，将曲线 AB_1C_1 分成若干段，每段长度均为 S，即 $AB_1=B_1C_1=S$。在各段圆弧长度相等的情况下，分别以点 B_1 和 C_1 为原点，在其切线方向下建立 $X_1B_1Z_1$ 坐标系和 $X_2C_1Z_2$ 坐标系。根据数学公式计算，可以由曲率 k_1，k_2 求得旋转角 θ_1，θ_2。然后再根据几何关系，在 XAZ 坐标系中可以求出 B_1 的坐标 $((1-\cos\theta_1)/k_1,\sin\theta_1/k_1)$，然后将坐标系沿向量 $\overrightarrow{AB_1}$ 平移旋转至坐标系 $X_1B_1Z_1$，在坐标系 $X_1B_1Z_1$ 中求出点 C_1 的坐标 $(\sin\theta_2/k_2,(1-\cos\theta_2)/k_2)$，以此类推。坐标平移旋转矩阵公式为

$$\boldsymbol{N}=\begin{bmatrix}\cos\theta & -\sin\theta & (1-\cos\theta)t_x+t_y\sin\theta\\ \sin\theta & \cos\theta & (1-\cos\theta)t_y+t_x\sin\theta\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{11}$$

式中，t_x，t_y 为坐标平移时横纵坐标的平移量，平移旋转后的坐标值公式为

$$\begin{bmatrix}x^*\\ y^*\\ 1\end{bmatrix}=\boldsymbol{N}\begin{bmatrix}x\\ y\\ 1\end{bmatrix} \tag{12}$$

由以上公式可知，根据离散的曲率点信息，通过平移旋转矩阵公式求出其余点的坐标，再利用插值

函数对这些离散的坐标点进行插值运算，重建软体操作器模型，即可实现软体操作器的可视化。

2 实验装置与试样

2.1 弯曲变形传感实验装置

图 3 为软体操作器弯曲变形实验系统原理图，其中包括光纤传感部分、软体操作器模型、光纤解调部分、模型重构部分。该系统主要包括 4 个螺旋布设 FBG 传感器、1 个宽带光源、1 个耦合器、1 台光谱仪和 1 台装有重构软件的上位机。

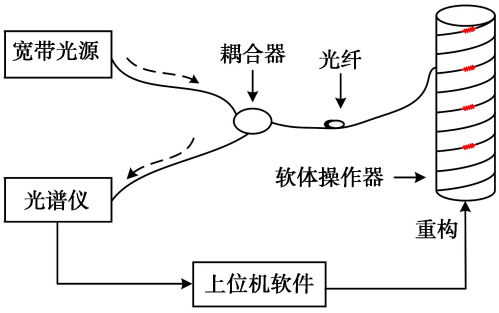


图 3 实验原理图

由宽带光源发出的光信号经过耦合器入射到 FBG 传感器内，位移平台推动软体操作器使其发生弯曲变形，根据 FBG 的波长选择通过性，满足布拉格条件的波长被反射回到光谱仪中，记录光谱仪中的反射光谱数据。

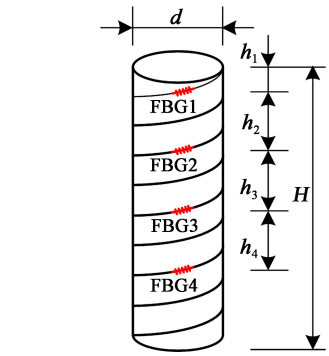
FBG 采用紫外曝光技术的刻写方式，在同一根光纤上刻写 4 个波长不同的光栅，栅区长度为 10 mm。同时，确保 FBG 的中心波长可避免波长漂移后波峰交叉、重叠，导致反射谱无法解调的问题。4 个 FBG 的初始中心波长分别为：1 531.025 0，1 534.756 3，1 538.675 0 和 1 542.368 8 nm。

光谱仪型号为 YOKOGAWAAQ6370C，解调范围为 600～1 700 nm，最高波长分辨率可达 20 pm，功率测量最低范围为－90 dBm。

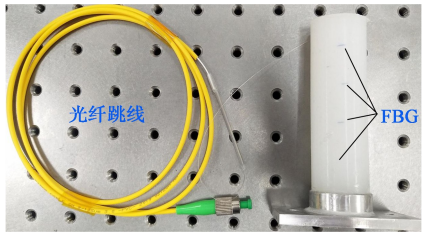
2.2 软体操作器试样

软体操作器模型的制造流程可分为以下 4 步：(1)利用 3D 打印技术完成模具制作。模具 1 内表面为螺旋形，内径为 25 mm，螺纹深度为 1 mm；模具 2 为内表面没有螺纹的圆筒形模具，即是光纤封装模具，内径为 28 mm；(2)采用 Ecoflex-0050 硅胶按照 1∶1 的比例将 A，B 溶液倒入烧杯中，并沿同一个方向搅拌均匀，防止溶液产生气泡。将搅拌后的溶液倒入密封好的模具 1 中，室温下固化 24 h 后开模；(3)沿着螺旋形表面布设 FBG 传感器，并将光纤两端用 6800 强力速干胶固定；(4)将螺旋布设 FBG 传感器后的模型放置于模具 2 中，在其表面覆盖与软体操作器模型同样材质的硅胶溶液，并在室温下再次固化 24 h，形成 FBG 传感器的保护层，即封装。

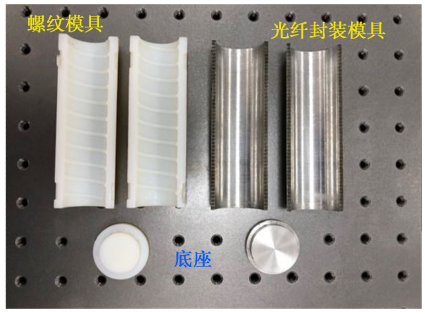
这种方法可避免传统的胶水封装，可以更好地保护光纤光栅传感器的性能。同时，该粘接剂与光纤光栅的耦合性比较高，不仅可以增加传感器的寿命，还可以抑制传感器的零点漂移特性。螺旋布设 FBG 的软体操作器试样如图 4 所示。



(a) 螺旋布设 FBG 示意图



(b) 软体操作器试样实物图



(c) 模具实物图

图 4 软体操作器模型

由图 4(a)可知，软体操作器试样的长度为 $H=100$ mm，直径 $d=28$ mm，FBG 传感器的编号从上至下依次为 FBG1，FBG2，FBG3，FBG4，其中 $h_1=10$ mm，$h_2=30$ mm，$h_3=50$ mm，$h_4=70$ mm，其中红色部分即代表螺旋布设光纤光栅在软体操作器中的位置。

3　实验分析与讨论

3.1　弯曲角度测量方法

弯曲角度的测量原理如图 5 所示：假设软体操作器水平放置，将操作器的中心线记为 x 轴，垂直于操作器中心线的方向记为 y 轴，建立直角坐标系 xoy。当操作器发生弯曲时，取其不同状态下的顶点 M_0，M_1，M_2 和 M_3，并作切线 I_0，I_1，I_2 和 I_3，过顶点 M_1，M_2 和 M_3 作垂线交 y 轴于点 N_1，N_2 和 N_3，将不同弯曲状态下的角度记为 β_1，β_2 和 β_3，以此方法计算弯曲角度[16]。根据摄像机拍摄的图片，计算软体操作器在不同弯曲状态下的角度值。

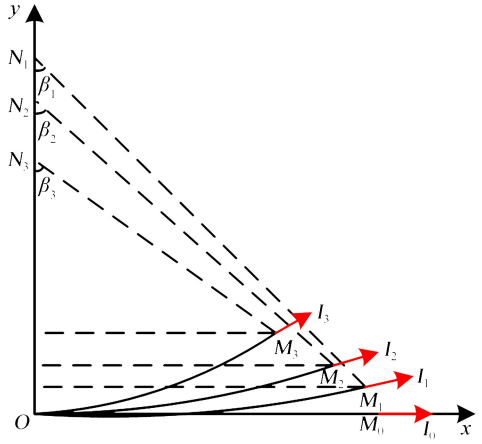


图 5　弯曲角度测量原理示意图

3.2　弯曲变形传感实验

所采用的实验系统如图 6 所示，软体操作器的底端固定在位移平台的工装夹具上。同时，保证在实验过程中，软体操作器内的 FBG 传感器位于弯曲变形时的外侧，即离位移平台近的一侧。在实验时，位移平台推动软体操作器移动，导致其弯曲变形，进而造成 FBG 传感器中心波长的漂移，并利用摄像机记录软体操作器的弯曲状态，以便后续分析其弯曲角度。为了减小操作中造成的随机误差，需进行多次重复性实验，以确保实验数据的可靠性。为了验证螺旋布设 FBG 可以应用于软体操作器的形状感知，测量了软体操作器不同弯曲状态下的螺旋布设 FBG 的反射谱特性。

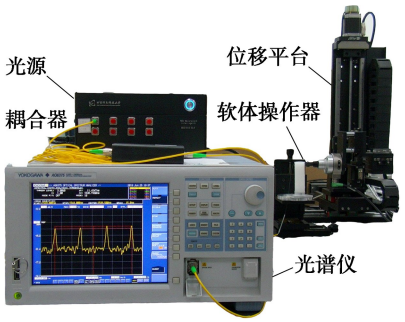
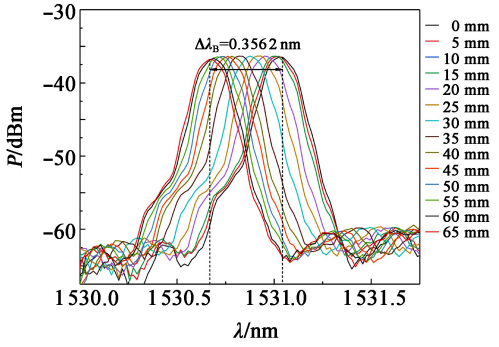


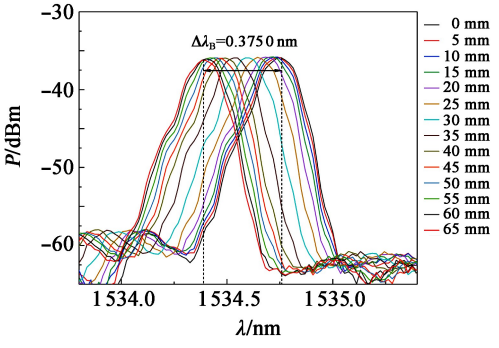
图 6　实验装置实物图

在实验过程中，利用光谱仪采集 FBG 传感器反射谱数据，将四个反射峰在各自的波长范围内提取出来，并绘制成光谱图。4 个螺旋布设 FBG 在不同位移下的波长漂移光谱图如图 7 所示。

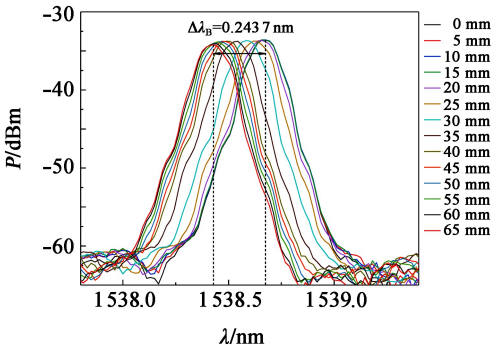
由图 7 可知，FBG 传感器的中心波长随着位移平台的位移增大向着波长减小的方向漂移。由此可以推断，FBG 传感器在软体操作器弯曲过程中处于压缩的状态，设 FBG 传感器中心波长减小的方向为正方向。记录 4 个 FBG 在不同弯曲状态下的峰值，计算其波长漂移量，并将 4 个 FBG 中心波长漂移情况记录在一起，对比 4 个 FBG 在软体操作器中不同位置的灵敏度。



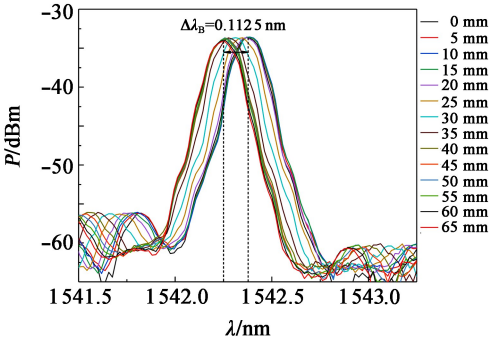
(a)　FBG1 波长漂移



(b)　FBG2 波长漂移



(c)　FBG3 波长漂移



(d) FBG4 波长漂移

图 7 4 个 FBG 在不同位移下的波长漂移

图 8 所示为螺旋布设光纤光栅的中心波长漂移量与弯曲角度之间的变化关系。由分析可知，螺旋布设 FBG 的中心波长漂移量随着弯曲角度的增大而增大，其中 FBG1，FBG2，FBG3 的曲线增势大致相同，呈近似线性增长。但是，螺旋布设 FBG 在软体操作器中不同位置的灵敏度不同。由实验数据分析可得，4 个螺旋布设 FBG 对应的灵敏度分别为 6.8，7.1，5.2 和 4.4 pm/(°)，其中 FBG2 的灵敏度最大。由分析可知，软体操作器中上部位置的弯曲变形量较大，适合 FBG 传感器的布设。当软体操作器弯曲角度大于 26°之后，螺旋布设 FBG 的中心波长漂移量增大趋势变缓。其中，当 FBG4 在软体操作器弯曲角度大于 37°之后，其中心波长漂移量不再变化，曲线呈水平状态，这是因为软体操作器底端固定，限制了软体操作器下半部分的弯曲变形。这表明螺旋布设 FBG 的灵敏度大小与传感位置有着密切关系。

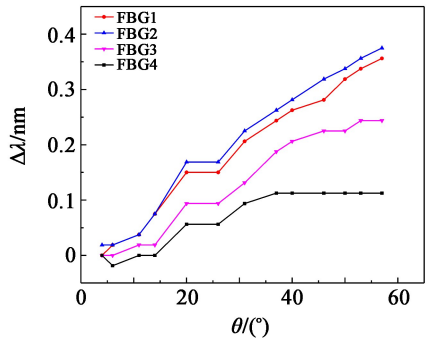
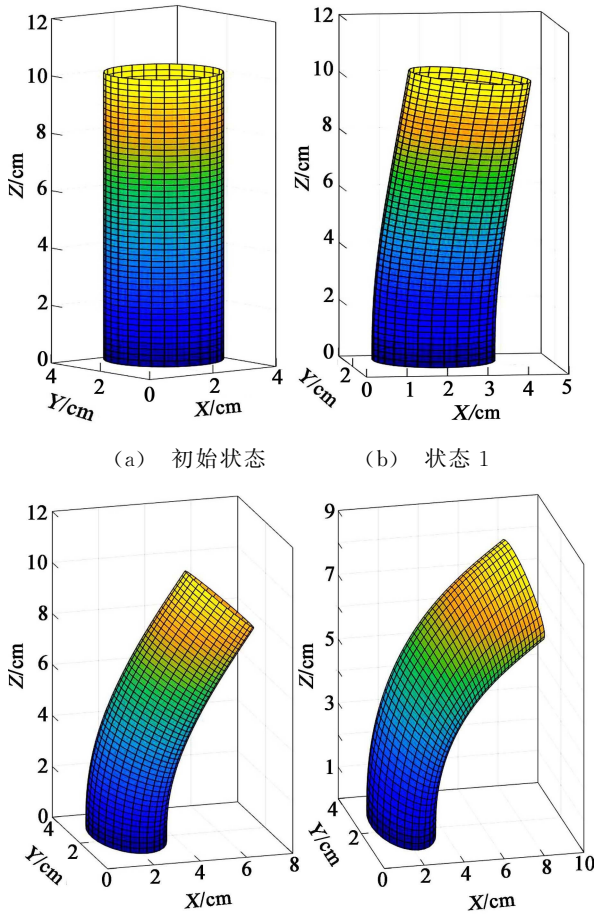


图 8 波长漂移量与弯曲角度之间的关系

3.3 弯曲变形重构

通过对操作器的弯曲状态建立运动坐标系，根据 4 个 FBG 测量点的中心波长漂移量及弯曲角度信息，进而计算弯曲曲率，并求出测量点的坐标，再进行插值运算，从而完成软体操作器的三维形状重建。取软体操作器在 4 种不同弯曲状态下的重构图，如图 9 所示。



(a) 初始状态 (b) 状态 1

(c) 状态 2 (d) 状态 3

图 9 不同弯曲状态下的软体操作器三维重构模型

通过将软体操作器弯曲变形时的实际测量值与软体操作器在不同弯曲状态下的重构结果进行比较，如表 1 所示，可得软体操作器的实际测量值与重构值之间的最大误差值为 4.29%。由此表明本文所提出的螺旋布设光纤光栅的方法适用于软体操作器的弯曲形状传感测量。

表 1 三种弯曲状态下的重构误差分析

弯曲状态	状态 1	状态 2	状态 3
实际值/(°)	14.0	37.1	53.6
重构值/(°)	13.4	36.3	51.8
误差/%	4.29	2.16	3.36

4 结论

(1)针对软体操作器弯曲伸缩运动时的形状传感问题，提出了一种螺旋布设光纤光栅的传感方法，并验证了其可行性。

(2)验证了螺旋布设光纤光栅的软体操作器的弯曲形状传感特性,实验结果表明:在软体操作器的不同位置上螺旋布设光纤光栅的灵敏度最大为 7.1 pm/(°),软体操作器三维变形形状的重构误差不大于 4.29%。

(3)螺旋型光纤传感方法在软体操作器形状传感方面具有广阔的应用前景,并可延伸应用于微创手术、康复机器人等领域。

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] Pfeifer R, Lungarella M, Iida F. The challenges ahead for bio-inspired "soft" robotics[J]. Commun. of the ACM, 2012, 55(11): 76.

[3] Ranzani T, Gerboni G, Cianchatti M, et al. A bioinspired soft manipulator for minimally invasive surgery[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2015, 10(3): 035008.

[4] Tao T, Chen Q, Da J, et al. Real-time 3-D shape measurement with composite phase-shifting fringes and multi-view system[J]. Opt. Express, 2016, 24(18): 20253.

[5] Huang Y R, Kuo S A, Stach M, et al. A high sensitivity three-dimensional-shape sensing patch prepared by lithography and inkjet printing[J]. Sensors, 2012, 12(12): 4172-4186.

[6] Wang Y, Negahdaripour S, Avkin M D. Calibration and 3D reconstruction of underwater objects with non-single-view projection model by structured light stereo imaging[J]. Appl. Opt., 2016, 55(24): 6564.

[7] 刘铁根，王　双，江俊峰，等. 航空航天光纤传感技术研究进展[J]. 仪器仪表学报，2014，35(8)：1681-1692.
Liu Tiegen, Wang Shuang, Jiang Junfeng, et al. Advances in optical fiber sensing technology for aviation and aerospace application[J]. Chinese J. of Scientific Instrument, 2014, 35(8): 1681-1692.

[8] 徐国权，熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. 中国光学，2013，6(3)：306-317.
Xu Guoquan, Xiong Daiyu. Application of fiber Bragg grating sensing technology in engineering[J]. Chinese Opt., 2013, 6(3): 306-317.

[9] 常天英，李东升，隋青美，等. 光纤光栅传感技术在分岔隧道模型中的实验研究[J]. 仪器仪表学报，2008，29(1)：103-108.
Chang Tianying, Li Dongsheng, Sui Qingmei, et al. Experiment research of fiber grating sensor in the forked tunnel model[J]. Chinese J. of Scientific Instrument, 2008, 29(1): 103-108.

[10] Nor Y, Sareh S, Back J, et al. A three-axial body force sensor for flexible manipulators[C]// Proc. of IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation, 2014: 6388-6393.

[11] Ge J, James A E, Xu L, et al. Bidirectional soft silicone curvature sensor based on off-centered embedded fiber Bragg grating[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2016, 28(20): 2237-2240.

[12] Duncan R G, Froggatt M E, Kreger S T, et al. High-accuracy fiber-optic shape sensing[C]// Proc. of Inter. Symp. on: Smart Structures & Materials & Nondestructive Evaluation & Health Monitoring, 2007: 65301s-11.

[13] 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 Daoming, Sun Guangkai, Li Hong, et al. Optical fiber sensing and reconstruction method for morphing wing flexible skin shape[J]. Chinese J. of Scientific Instrument, 2018, 39(1): 144-151.

[14] 钱晋武，郑庆华，张伦伟，等. 渐进式内窥镜形状的感知和重建[J]. 光学精密工程，2004，12(5)：518-524.
Qian Jinwu, Zheng Qinghua, Zhang Lunwei, et al. Deformation sensing and incremental shape reconstruction for intelligent colonoscope[J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(5): 518-524.

[15] 娄小平，陈仲卿，庄　炜，等. 非正交 FBG 柔杆空间形状重构误差分析及标定[J]. 仪器仪表学报，2017，38(2)：386-393.
Lou Xiaoping, Chen Zhongqing, Zhuang Wei, et al. Error analysis and calibration for FBG shape reconstruction based on non-orthogonal curvatures [J]. Chinese J. of Scientific Instrument, 2017, 38(2): 386-393.

[16] 高　东，孟凡勇，宋言明，等. 植入光纤光栅的软体驱动器形状传感研究[J]. 仪器仪表学报，2019，40(2)：155-163.
Gao Dong, Meng Fanyong, Song Yanming, et al. Research on the shape sensing of embedded fiber Bragg grating for soft actuator[J]. Chinese J. of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 155-163.

[17] 章亚男，肖　海，沈林勇. 用于光纤光栅曲线重建算法的坐标点拟合[J]. 光学精密工程，2016，24(9)：2149-2157.
Zhang Yanan, Xiao Hai, Shen Linyong. Coordinate point fitting in FBG curve reconstruction algorithm[J]. Optical and Precision Engin., 2016, 24(9): 2149-2157.

作者简介:

朱伟涛(1995—),男,河南人,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感测量;

孙广开(1984—),男,河北人,2015 年于北京航空航天大学并获博士学位,现为副教授,主要研究方向为飞行器监测技术和生物医学检测技术。