光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023071802

基于轴向应变误差修正的 FBG 形状重构算法

尚秋峰[1,2,3]，向方宇[1*]，樊　松[1]

（华北电力大学 1. 电子与通信工程系；2. 河北省电力物联网技术重点实验室；
3. 保定市光纤传感与光通信技术重点实验室，河北 保定 071003）

摘　要： 针对轴向应变误差影响光纤布拉格光栅(FBG)形状传感器的重构精度问题，提出了一种基于轴向应变误差修正的形状重构算法。纤芯位置偏差是造成轴向应变误差的主要因素，为了获取光纤形状传感器的纤芯位置偏差，提出了三芯光纤形状传感器的误差理论模型。通过 ANSYS Workbench 对误差理论模型进行有限元建模仿真，将纤芯位置偏差和标定偏差代入误差理论模型，对存在位置偏差的纤芯轴向应变数据进行修正，并与理想纤芯位置处的轴向应变数据进行对比，证明了该理论模型对存在误差的轴向应变数据具有良好的修正效果。为了计算每个检测点的纤芯位置偏差，根据提出的误差理论模型，提出了一种基于二分法逐次逼近的 FBG 形状传感器纤芯位置偏差计算方法。仿真结果表明，纤芯位置偏差修正前后重构曲线的最大位置误差从 1.74 mm 减小到 0.10 mm。对于自封装的 FBG 形状传感器，使用纤芯位置偏差修正前后，重构空间曲线的最大位置误差从 19.81 mm 减小到 7.66 mm。

关键词： 光纤传感；光纤布拉格光栅；形状重构；误差补偿

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2023)06－0972－09

FBG Shape Reconstruction Algorithm Based on Axial Strain Error Correction

SHANG Qiufeng[1,2,3], XIANG Fangyu[1], FAN Song[1]

(1. Dept. of Electronic and Commun. Engin.; 2. Hebei Key Lab. of Power Internet of Things Technol.; 3. Baoding Key Lab. of Optical Fiber Sensing and Optical Communication Technol., North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN)

Abstract: To solve the problem that axial strain error affects the reconstruction accuracy of optical fiber grating shape sensor, a shape reconstruction algorithm based on axial strain error correction is proposed. Core position deviation is the main factor that causes axial strain error. In order to obtain the core position deviation of fiber shape sensor, an error theoretical model of three-core fiber shape sensor is proposed. Finite element modeling and simulation were carried out by ANSYS Workbench. The core position deviation and calibration deviation were substituted into the error theoretical model, the axial strain data of the core with the position deviation was corrected, and it was compared with the axial strain data at the ideal core position. It was proved that the theoretical model has a good correction effect on the axial strain data with errors. In order to calculate the core position deviation of each detection point, a method of calculating the core position deviation of FBG shape sensor based on dichotomous successive approximation was proposed according to the proposed error theoretical model. The simulation results show that before and after the core position deviation correction, the maximum position error of the reconstructed curve is increased from 1.74 mm to 0.10 mm. And for the self-encapsulated FBG

收稿日期：2023－07－18.

基金项目：国家自然科学基金项目(61775057)；河北省自然科学基金项目(E2019502179).

* **通信作者：**向方宇　**E-mail：** 1151789391@qq.com

shape sensor, the maximum position error of the reconstructed space curve is increased from 19.81 mm to 7.66 mm.

Key words: optical fiber sensing; fiber Bragg grating; shape reconstruction; error compensation

0　引言

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Gratings,FBG)形状传感技术被广泛应用于各种 2D 和 3D 形状传感中[1-4]。相较于传统的电学形状传感器,光纤光栅形状传感器具有高灵敏性、高精确度、不易受电磁干扰、化学性能稳定、小巧轻便等优点。

光纤光栅形状传感器的形状重构精度至关重要,光纤光栅形状传感器的形状重构误差主要来源于空间曲率的测量误差和形状重构的算法误差。2012 年,Moore 等[5]提出了一种基于 Frenet-Serret 方程的三维曲线重构算法,该方法将光纤等效为基尔霍夫杆模型,利用各个纤芯的轴向应变信息计算曲线的曲率和挠率,然后通过求解 Frenet-Serret 方程完成多芯光纤的形状重构。2017 年,娄小平等[6]提出了一种具有温度补偿特征的非正交 FBG 三维形状重构方法,并对标定方法进行改进,降低了纤芯位置偏差对重构精度的影响。2018 年,张俊康等[7]提出基于 FBG 的柔性蒙皮形状传感及重构方法,根据 FBG 波长漂移量计算得出传感点的曲率信息,利用曲面重建算法对不同变形角度的柔性蒙皮进行形状重构。章亚南[8]和张东伟[9]分别于 2019 年和 2020 年将光栅点应变传递率与形状重构相结合,提高了 FBG 形状传感器的重构精度。2021 年,吕安强等[10]利用分布式光纤传感技术测量的光纤应变进行三芯光纤三维形态重构,求解并提取了单向弯曲和 S 形弯曲的光纤应变分布数据,并代入设计的算法中进行求解,实现了三芯光纤的三维形态重构。同年,郭永兴等[11]提出了一种基于双层正交光纤布拉格光栅的可实现三维形状测量的柔性传感器,通过测量空间传感点的曲率建立三维坐标系,将曲率信息转化为空间坐标信息,再通过对空间离散坐标点的插值拟合来重建被测物体表面的三维形状。

上述研究均未考虑轴向应变误差对重构精度的影响。2014 年,Pauer 等[12]对形状传感器中光栅位置不精确影响重构精度这一问题进行了研究。2020 年,Jin 等[13]通过理论分析建立了轴向应变误差模型,并提出了一种利用 FBG 实测数据对轴向应变误差进行校正的方法,最后通过实验验证了该算法的有效性。2021 年,吕佳豪等[14]提出了基于曲率与角度校正的多芯光纤三维形状重构方法。通过引入方向角和曲率校正系数,改进了柔性三维形变多芯光纤重构算法。2022 年,Tan 等[15]提出了一种基于遗传算法的自校准方法,来实现光纤形状传感器的纤芯位置偏差的校正,并通过不同弯曲方向和曲率下的仿真和实验验证了该方法的可行性。但以上方法均未考虑在计算纤芯位置偏差时弯曲方向也可能存在偏差,这导致计算出的纤芯位置偏差实际上是纤芯位置偏差和弯曲方向偏差的耦合结果,影响形状重构精度。

为提高光纤形状传感器的重构精度,针对纤芯位置偏差和弯曲方向偏差同时存在的问题,本文提出了一种基于轴向应变误差修正的形状重构算法,有效提高了形状重构精度。

1　三芯光纤形状传感器轴向应变误差补偿模型

多芯光纤形状传感器在封装过程会引入纤芯位置偏差,使得实际光纤铺设位置偏离理想位置,影响光纤对轴向应变数据的采集,进而影响形状传感器精度。针对这一问题,本文提出了一种基于轴向应变误差修正的形状重构算法,该算法由纤芯位置偏差角度计算、纤芯轴向应变误差补偿以及形状重构三部分组成。

1.1　三芯光纤形状传感器纤芯位置偏差模型

本文研究对象为三芯光纤,所以纤芯位置偏差理论模型以三芯光纤为例。当存在纤芯位置偏差时,传感器某检测点截面图如图 1 所示。

图 1 中,A_i,B_i,C_i 表示第 i 个检测点三个纤芯的理想位置,A'_i,B'_i,C'_i 为第 i 个检测点三个纤芯的实际位置,截面图上某应变测量点与 O 点连线组成的线段与 x 轴正向夹角记为 β,τ_{ai},τ_{bi},τ_{ci} 分别表示当前检测点的三个纤芯位置偏差。其中 τ_{ai},τ_{bi},τ_{ci} 计算方法如下:

$$\begin{cases}\tau_{ai}=\beta_{A'_i}-\beta_{A_i}\\ \tau_{bi}=\beta_{B'_i}-\beta_{B_i}\\ \tau_{ci}=\beta_{C'_i}-\beta_{C_i}\end{cases}\tag{1}$$

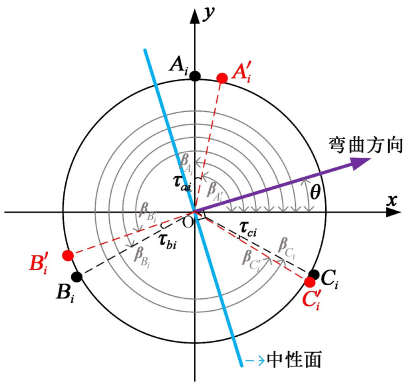


图 1 纤芯位置偏差模型截面图

计算三个纤芯实际位置与理论位置处的应变关系式，首先需计算出应变测量点与中性轴的距离、应变测量点与 x 轴正方向夹角以及传感器弯曲方向之间的关系。设某应变检测点与传感器几何中心连接组成的直线与 x 轴正方向夹角为 β，该点距离传感器中性轴距离记为 d_β，则由几何关系推理可得：

$$d_\beta = |\, r\cos(\theta-\beta)\,|;\theta \in (0\sim 2\pi) \tag{2}$$

其中，r 表示纤芯到传感器中轴的距离，θ 为传感器弯曲方向与 x 轴正方向夹角。纤芯 A 的理想纤芯位置 A_i 和存在位置偏差的纤芯位置 A'_i 的应变关系式可表示为：

$$\varepsilon_{A_i} = d_{\beta_{A_i}}/R_{A_i},\varepsilon_{A'_i} = d_{\beta_{A'_i}}/R_{A'_i} \tag{3}$$

当传感器弯曲时，应变测量点 A_i 和 A'_i 的弯曲半径 R_{A_i} 和 $R_{A'_i}$ 之间的关系如公式(4)所示：

$$R_{A'_i} = R_{A_i} - r(1-\sin\beta_{A'_i}) \tag{4}$$

由于光纤形状传感器直径非常微小，因此可以将公式(4)简化为：

$$R_{A'_i} = R_{A_i} \tag{5}$$

联立公式(1)，(2)，(3)，(5)，每根纤芯实际位置与理论位置应变之间的关系可表示为：

$$\begin{cases}\varepsilon_{A_i} = \left|\dfrac{\cos(\theta-\beta_{A_i})}{\cos(\theta-(\beta_{A_i}+\tau_{ai}))}\right|\varepsilon_{A'_i}\\ \varepsilon_{B_i} = \left|\dfrac{\cos(\theta-\beta_{B_i})}{\cos(\theta-(\beta_{B_i}+\tau_{bi}))}\right|\varepsilon_{B'_i}\\ \varepsilon_{C_i} = \left|\dfrac{\cos(\theta-\beta_{C_i})}{\cos(\theta-(\beta_{C_i}+\tau_{ci}))}\right|\varepsilon_{C'_i}\end{cases} \tag{6}$$

在实际中，传感器弯曲时，实际坐标系位置并不一定与理想坐标系位置重合，这将导致实际弯曲方向与理论弯曲方向存在偏差，且偏差角度与理论坐标系和实际坐标系偏差角度相等，将这种偏差记作标定偏差 ω，标定偏差示意图如图 2 所示。

当纤芯位置偏差和标定偏差同时存在时可以转化为只存在纤芯位置偏差的情况。等效的三个纤心位置偏差分别记为 φ_{ai}，φ_{bi}，φ_{ci}，表示为：

$$\varphi_{ji} = |\,\tau_{ji}-\omega\,|,(j=a,b,c) \tag{7}$$

则多芯光纤轴向应变误差理论模型为：

$$\begin{cases}\varepsilon_{A_i} = \left|\dfrac{\cos(\theta-(\beta_{A_i}-\omega))}{\cos(\theta-(\beta_{A_i}+(\tau_{ai}-\omega)))}\right|\varepsilon_{A'_i}\\ \varepsilon_{B_i} = \left|\dfrac{\cos(\theta-(\beta_{B_i}-\omega))}{\cos(\theta-(\beta_{B_i}+(\tau_{bi}-\omega)))}\right|\varepsilon_{B'_i}\\ \varepsilon_{C_i} = \left|\dfrac{\cos(\theta-(\beta_{C_i}-\omega))}{\cos(\theta-(\beta_{C_i}+(\tau_{ci}-\omega)))}\right|\varepsilon_{C'_i}\end{cases} \tag{8}$$

式中，β_{A_i}，β_{B_i}，β_{C_i} 为三个纤芯的理想位置，这里分别为 90°，210°，330°。通过该模型即可计算出每个纤芯的位置偏差以及标定偏差。在实际中，由于形状传感器弯曲状态是随机的，并不知道传感器实际弯曲方向 θ，需要通过公式(9)计算出弯曲方向：

$$\theta = \arctan\left(\frac{\cos(\beta_{A_i}+\tau_{ai})\varepsilon_{B'_i}-\cos(\beta_{B_i}+\tau_{bi})\varepsilon_{A'_i}}{\sin(\beta_{B_i}+\tau_{bi})\varepsilon_{A'_i}-\sin(\beta_{A_i}+\tau_{ai})\varepsilon_{B'_i}}\right) \tag{9}$$

结合公式(6)，即可求出修正后的轴向应变数据。最后结合三芯光纤形状还原算法，即可完成形状重构。

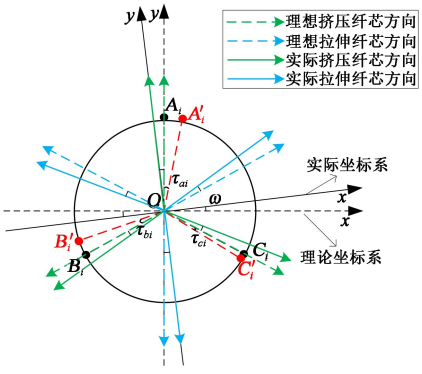


图 2 标定偏差示意图

2 基于 ANSYS Workbench 的误差补偿模型仿真验证与分析

为验证所提误差理论模型的正确性，使用 ANSYS Workbench 进行有限元仿真分析。

2.1 几何模型建立

通过在理想纤芯位置周围布置存在角度偏差的纤芯模拟纤芯位置偏差。如图 3 为多芯光纤误差模型纤芯分布图。图中 a_0，b_0，c_0 为理想纤芯位置，纤芯 a_1，a_2 模拟纤芯 a_0 处纤芯角度偏差分别为

−10°,5°的情况,纤芯 b_1,b_2 模拟纤芯 b_0 处纤芯位置偏差分别为−10°,10°的情况,纤芯 c_1,c_2 模拟纤芯 c_0 处纤芯位置偏差分别为−5°,5°的情况。

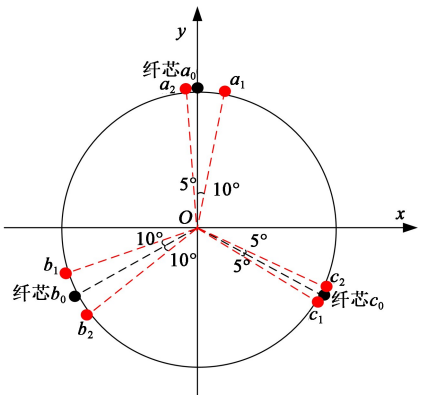
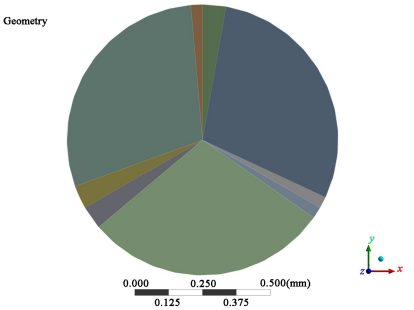
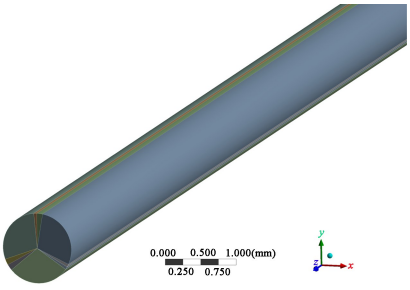


图 3　多芯光纤误差模型光纤分布示意图

将 6 根纤芯简化为 6 根直线,建立如图 4 所示的几何模型。



(a) 截面图



(b) 三维图

图 4　三芯光纤形状传感器纤芯位置偏差模型

2.2　仿真结果与分析

传感器底端施加固定约束,另一端分别施加沿与 x 轴正向夹角成 80°,260°,90°,270°,95°,275°,200°,20°,210°,30°,215°,35°,320°,140°,330°,150°,335°,155°方向 3 N 的力,传感器则会弯曲成 18 种不同的状态。其中与 x 轴正向夹角为 90°,270°,210°,30°,330°,150°,6 种弯曲方向模拟无标定偏差的情况;与 x 轴正向夹角为 80°,260°,200°,20°,320°,140°,6 种弯曲方向模拟标定偏差为−10°的情况;与 x 轴正向夹角为 95°,275°,215°,35°,335°,155°,6 种弯曲方向模拟标定偏差为 5°的情况。以传感器中心轴的坐标数据作为传感器弯曲后的空间形状如图 5 所示。

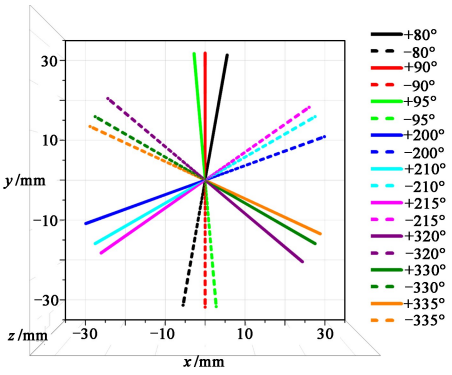
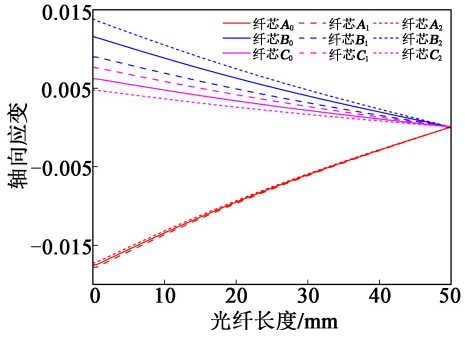
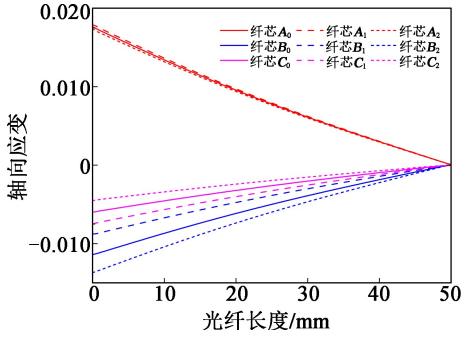


图 5　传感器弯曲状态示意图

传感器弯曲方向不同,9 根纤芯对应的轴向应变结果不同,这里以弯曲方向为 80°,260°为例,展示两种弯曲状态下 6 个纤芯的轴向应变,如图 6 所示。



(a) 80°



(b) 260°

图 6　不同弯曲方向下 6 根纤芯轴向应变关系图

为验证 FBG 形状传感器误差理论模型的正确性,设置标定偏差为−10°,则 6 种弯曲状态的实际弯曲方向分别为 80°,260°,200°,20°,320°,140°。传感器一共有 5 个检测点,每个检测点由 3 个沿检测点截面成 120°的 FBG 组成,FBG 由对应位置处的网格进行模拟,传感器底端第一层网格模拟第一个检测点,每相邻两个检测点间隔 11.25 mm,最后一

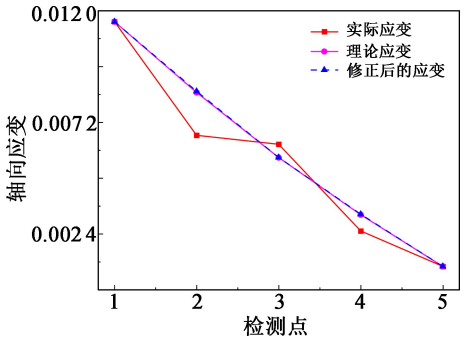
个检测点距底端间隔 45 mm。同时以纤芯 A 在第一个检测点的 FBG 为基准，建立笛卡尔三维坐标系，则 $\tau_{a1}=0$，其余 FBG 的纤芯位置偏差以该坐标系为基准。各个检测点的纤芯位置偏差按照表 1 进行设置。

表 1　各检测点纤芯位置偏差

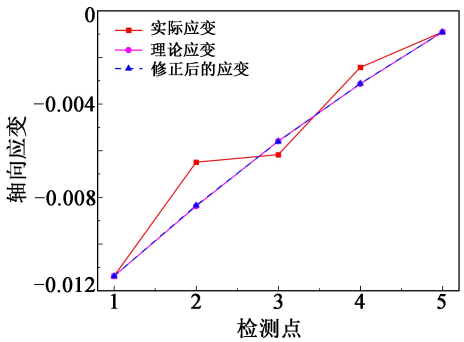
检测点	光栅串 A		光栅串 B		光栅串 C	
	实际位置	位置偏差	实际位置	位置偏差	实际位置	位置偏差
1	a_0	0°	b_1	−10°	c_0	0°
2	a_1	−10°	b_2	10°	c_2	5°
3	a_2	5°	b_0	0°	c_2	5°
4	a_1	−10°	b_1	−10°	c_0	0°
5	a_0	0°	b_0	0°	c_1	−5°

根据公式(8)、表 1 中设置的纤芯位置偏差以及实际应变数据，可计算出修正后应变数据。以弯曲方向 320°，140°为例，各个检测点上纤芯 A 的实际应变、理论应变与修正后应变对比如图 7 所示。

由图 7 可知，利用该模型修正后的轴向应变数据与理论轴向应变数据几乎重合，对纤芯位置偏差和标定偏差引起的轴向应变误差具有良好的修正效果，为纤芯位置偏差和标定偏差的计算奠定了基础。



(a) 320°



(b) 140°

图 7　传感器不同弯曲方向下纤芯 A 轴向应变修正效果

3　基于二分法逐次逼近的纤芯位置偏差计算方法

3.1　算法流程设计

首先导入各种弯曲状态下的应变数据，然后计算标定偏差集合和纤芯位置偏差集合。设置标定偏差和纤芯位置偏差可能出现的误差范围，最大误差范围为[−30°，30°]，再计算当前标定偏差下的纤芯位置偏差。每一个标定偏差都可以计算出一组最优的纤芯位置偏差，图 8 为当标定偏差角度为 ω 时，第 i 个检测点的纤芯位置偏差计算方法流程图。

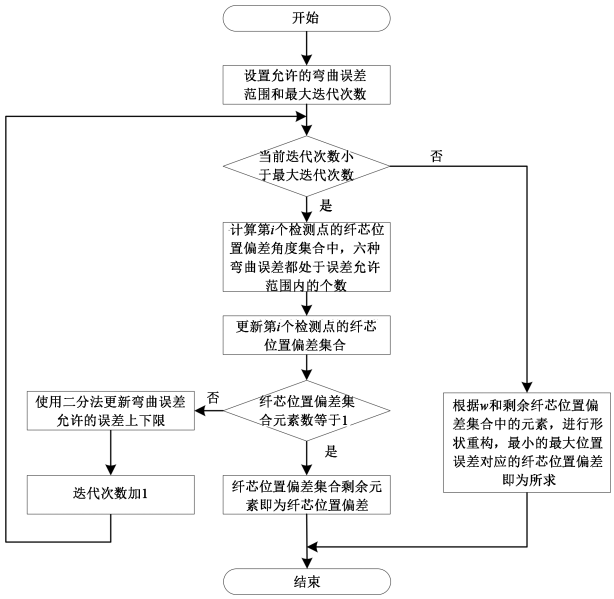


图 8　第 i 个检测点纤芯位置偏差计算方法流程图

由于每个检测点的纤芯位置偏差并没有任何联系，所以，应从第一个检测点开始，进行处理：

首先设置允许弯曲误差的范围，也就是二分法的上下限，本文设置为[−30°，30°]。同时设置最大迭代次数，图 9 为 5 个检测点分别遍历标定偏差集合时，在每次收敛时对应的迭代次数，由图可知最大迭代次数为 19，因此本文最大迭代次数设置为 19。

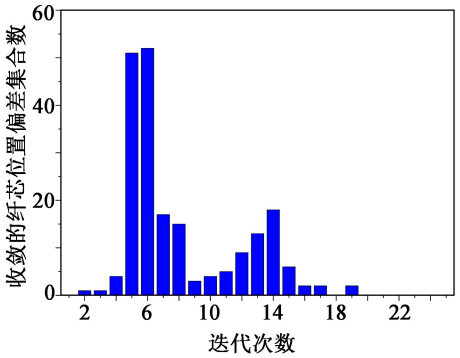


图 9　每次收敛时对应的迭代次数

然后计算实际弯曲方向。实际弯曲方向为理论弯曲方向与当前标定偏差之和。根据公式(8)的误差理论模型可知，为计算纤芯位置偏差，需要将传感器弯曲成六种不同的状态，但弯曲时可能会存在标

定偏差，所以从第一个可能存在的标定偏差开始，遍历标定偏差角度集合。

再计算弯曲角度误差。当前弯曲状态的弯曲角度误差为：通过三个纤芯应变数据计算出的弯曲方向与实际弯曲方向差值的绝对值。通过该方法可以得到六种弯曲状态的弯曲角度误差；

使用二分法逐次逼近最优弯曲误差范围。计算当前检测点的纤芯位置偏差集合中，六种弯曲误差都属于当前弯曲误差范围的个数，不满足该条件的纤芯位置偏差从集合中剔除，得到新的纤芯位置偏差集合，然后使用二分法更新允许弯曲误差范围上下限。若当前纤芯位置偏差集合都不能满足该条件，直接使用二分法更新允许弯曲范围上下限。若是迭代次数没有超过当前最大迭代次数，纤芯位置偏差集合元素便收敛为 1，那么该角度则为最优的纤芯位置偏差；若是不收敛，若是第一个检测点，则将所有不收敛的角度误差都作为当前标定偏差对应的最优纤芯位置偏差，若不是第一个检测点，则首先根据前面检测点的纤芯位置偏差和当前标定偏差修正各纤芯的应变数据，然后根据当前检测点的剩余纤芯位置偏差和当前标定偏差形状重构，最大位置误差最小时对应的纤芯位置偏差即为最优纤芯位置偏差。

最后继续计算剩余检测点在当前标定偏差下的纤芯位置偏差。本文仿真模型设置了 5 个检测点，所以计算 5 次即可。

3.2　仿真结果与分析

当标定偏差为－10°，纤芯位置偏差按照表 1 进行设置时，标定偏差和纤芯位置偏差的计算结果分别见图 10、图 11 和表 2。图中曲线最低点，即位置误差和的最小值对应的偏差角度为标定偏差，结果表明，计算出的标定偏差和纤芯位置偏差均与设置的角度偏差一致。

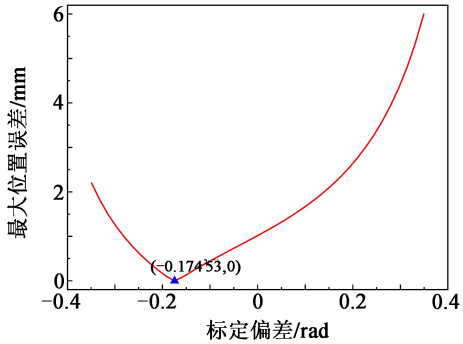


图 10　最大位置误差之和随标定偏差集合变化图

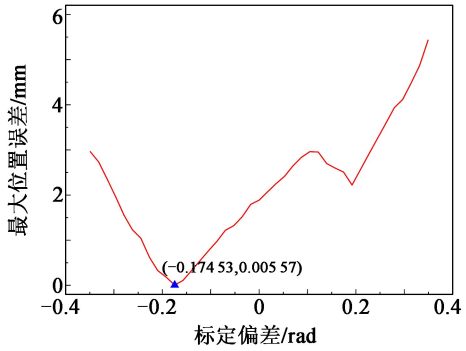
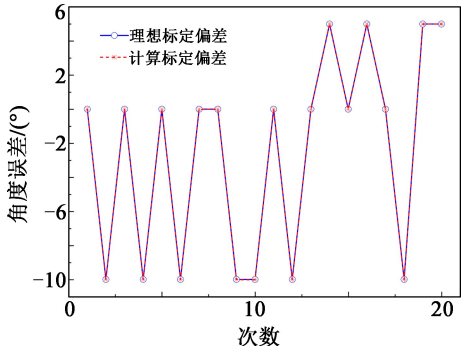


图 11　标定偏差和纤芯位置偏差同时存在时标定偏差计算结果

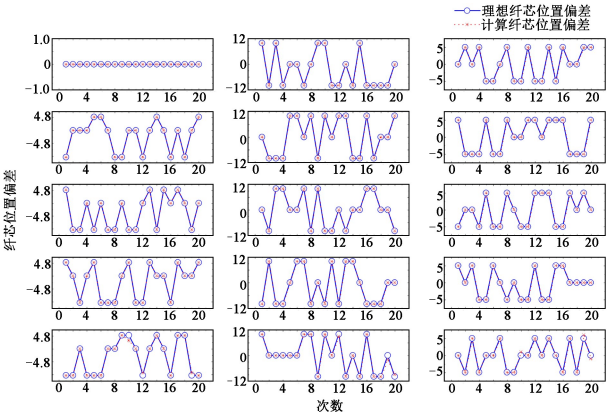
表 2　标定偏差和纤芯位置偏差同时存在时纤芯位置偏差计算结果

检测点	光栅串 A		光栅串 B		光栅串 C	
	实际位置偏差	计算位置偏差	实际位置偏差	计算位置偏差	实际位置偏差	计算位置偏差
1	0°	0°	−10°	−10°	0°	0°
2	−10°	−10°	10°	10°	5°	5°
3	5°	5°	0°	0°	5°	5°
4	−10°	−10°	−10°	−10°	0°	0°
5	0°	0°	0°	0°	−5°	−5°

最后，为验证算法的可靠性，进行 20 次标定偏差和纤芯位置偏差分离与计算实验，每次的标定偏差从－10°，0°，5°中随机选取，每个检测点上每根纤芯的位置偏差分别从 a_0，a_1，a_2，b_0，b_1，b_2，c_0，c_1，c_2



(a) 标定偏差计算结果与理想值对比图



(b) 纤芯位置偏差计算结果与理想值对比图

图 12　标定偏差和纤芯位置偏差计算结果

中随机选取。图 12(a)和(b)分别为 20 次实验中标定偏差和每个检测点纤芯位置偏差的计算结果。可以看出,每次实验都得到了较好的实验结果,证明该算法具有稳定性强、计算精度高的特点。

4 轴向应变误差补偿与形状重构

本小节的标定偏差和纤芯位置偏差与 3.2 中设置的相同。接下来将根据 3.2 小节中计算出的纤芯位置偏差对轴向应变数据进行补偿,然后利用补偿后的轴向应变数据进行形状重构。

4.1 轴向应变误差补偿

(1) 计算每个检测点的弯曲方向

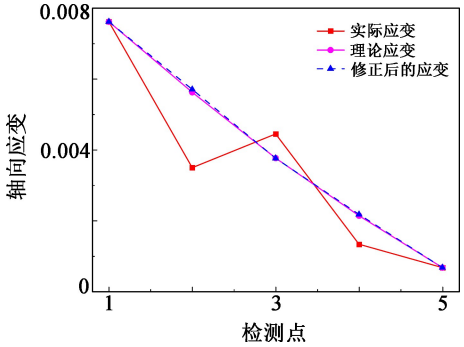
在实际中,传感器弯曲方向是任意的,这里选择传感器弯曲方向与 x 轴夹角成 335°的状态作为重构目标。根据公式(9)、3.2 节中计算出的纤芯位置偏差以及带有误差的应变数据,可计算出传感器的弯曲方向,计算结果如表 3 所示。

表 3 传感器每个检测点的弯曲方向

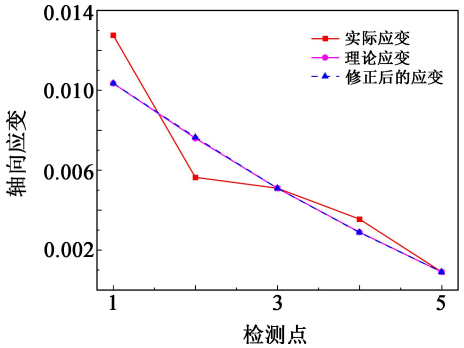
弯曲方向	检测点 1	检测点 2	检测点 3	检测点 4	检测点 5
理想弯曲方向/(°)	335	335	335	335	335
计算弯曲方向/(°)	335.008	334.873	334.938	334.668	334.696

(2) 轴向应变误差修正

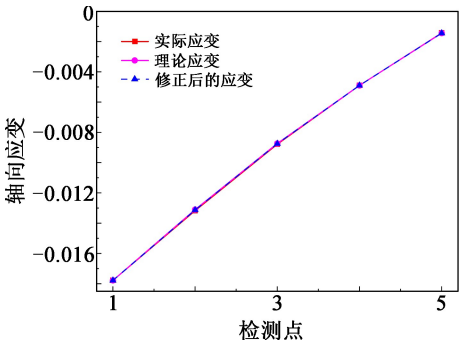
根据表 3 中计算出的每个检测点的弯曲方向、3.2 小节中计算出的纤芯位置偏差以及公式(6)对轴向应变误差进行修正,修正结果如图 13 所示。



(a) 纤芯 A



(b) 纤芯 B



(c) 纤芯 C

图 13 轴向应变修正结果

4.2 形状重构效果对比

将误差修正后的应变数据结合三芯光纤形状重构算法,即可完成形状重构,重构结果如图 14 所示。修正后重构误差对比如表 4 所示,修正后,最大位置误差从 1.74 mm 减少到 0.10 mm。

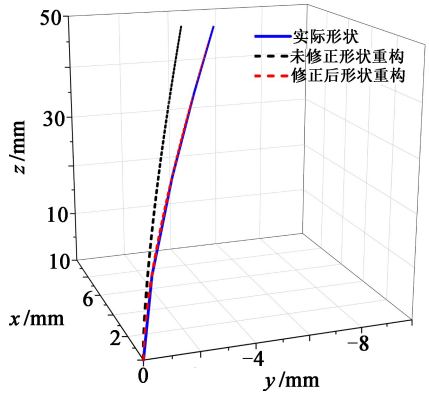


图 14 轴向应变误差修正前后重构效果对比图

表 4 仿真模型角度误差修正前后重构精度对比

参数	最大位置误差/mm	最大归一化误差
角度误差修正前	1.738 182 425	0.038 626 276
角度误差修正后	0.102 043 737	0.002 267 639

4.3 三芯 FBG 形状传感器设计与封装

采用直径为 1 mm 的铁镍合金丝作为形状传感器基材,等间隔 120°粘贴 3 根 FBG 传感阵列,FBG 阵列上有 5 个等间距分布的 FBG 传感器,FBG 栅区长为 13 mm,各检测点间隔 113 mm,柔性杆的总长度为 517 mm。使用环氧胶粘贴 FBG 阵列。设计并封装了如图 15 所示的光纤卡槽。

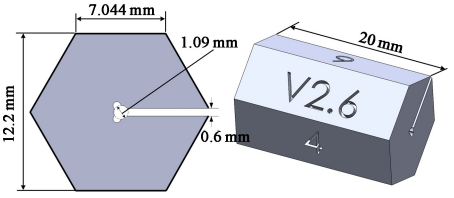


图 15 光纤卡槽

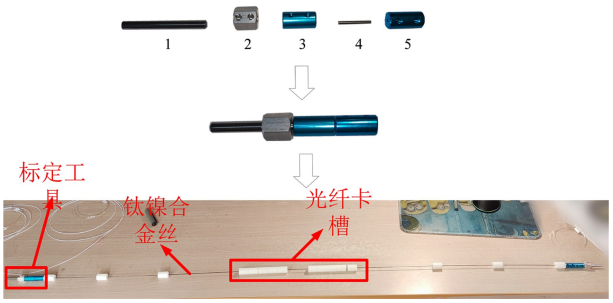


图 16　FBG 形状传感器

4.4　FBG 形状传感器的标定

为了控制形状传感器的标定方向，对形状传感器进行标定，理论情况下，检测点纤芯处的曲率与 FBG 中心波长变化量成正比，但在实际封装过程中，虽然使用了光纤卡槽对纤芯位置进行了限制，但难免会出现纤芯位置偏差，此外涂胶厚度、FBG 本身制作误差等因素也会导致曲率与中心波长变化量的关系与理论存在偏差，因此对每个 FBG 进行标定存在标定误差，以确定每个 FBG 中心波长变化量与曲率的关系。标定系统主要由 FBG 形状传感器、标定板、微光解调仪、笔记本电脑组成。以纤芯 A 为例，FBG 中心波长变化量与曲率关系如图 17 所示。

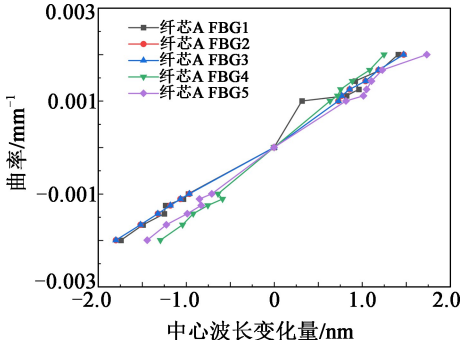


图 17　FBG 中心波长变化量与曲率对应关系图

4.5　基于 FBG 形状传感器误差修正的形状重构实验

通过形状传感器弯曲半径为 700 mm 时传感器的六种弯曲状态，计算标定偏差和每个检测点的纤芯位置偏差。标定偏差计算结果如图 18 所示，计算出的标定偏差为 −15°，纤芯位置偏差计算结果如表 5 所示。

采集传感器弯曲方向与 x 轴正向夹角为 30°、弯曲半径为 800 mm 时的曲线作为重构目标。根据实验计算出的纤芯位置偏差和标定偏差对每个 FBG 的曲率数据进行修正，图 19 所示为传感器实际弯曲形状、纤芯位置偏差修正前后形状重构效果对比图。

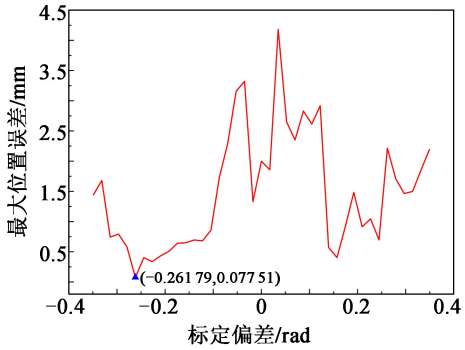


图 18　标定偏差计算结果

表 5　自封装 FBG 形状传感器纤芯位置偏差

检测点	纤芯 A 位置偏差	纤芯 B 位置偏差	纤芯 C 位置偏差
1	0°	−3°	3°
2	6°	3°	−16°
3	3°	6°	−20°
4	−20°	6°	8°
5	−4°	−2°	−2°

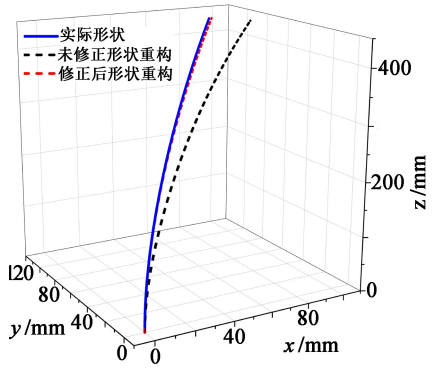


图 19　FBG 形状传感器重构效果对比图

由表 6 可知，修正后重构形状的最大位置误差从 19.81 mm 减小为 7.66 mm。

表 6　传感器角度误差修正前后重构精度对比

参数	最大位置误差/mm	最大归一化误差
纤芯位置偏差修正前	19.806 300 65	0.042 594 195
纤芯位置偏差修正后	7.660 295 924	0.016 473 755

5　结论

本文针对多芯光纤形状传感器纤芯位置偏差影响重构精度问题，提出了一种基于轴向应变误差修正的形状重构算法，该算法包括纤芯位置偏差角度计算、误差补偿和形状重构三部分。

为了计算纤芯位置偏差，提出了三芯光纤形状传感器轴向应变误差补偿模型，并依据该模型提出一种基于二分法逐次逼近的 FBG 形状传感器纤芯位置偏差计算方法。为了验证所提方法的有效性，

首先通过有限元模拟出一个 9 芯传感器模型，除了每个纤芯理想位置处存在纤芯外，在每根理想纤芯位置周围还存在两个具有位置偏差的纤芯，用来模拟多种不同组合的纤芯位置偏差，然后给模型施加力使其发生弯曲变形，导出每个纤芯的轴向应变数据，并代入误差模型进行验证。结果表明，轴向应变数据可以根据所提误差理论模型得到较好的修正，验证了该模型的有效性。

仿真结果表明，对轴向应变数据修正前后，最大位置误差从 1.74 mm 改善为 0.10 mm。实验结果表明，误差数据修正前后重构形状的最大位置误差从 19.81 mm 减少为 7.66 mm。

参考文献：

[1] 杨 洋，孔令宇，蔡伟康，等. 光纤形态传感器研究进展[J]. 半导体光电，2022，43(4)：642-654.
Yang Yang，Kong Lingyu，Cai Weikang，et al. Research progress of fiber optic shape sensor [J]. Semiconductor Optoelectronics，2022，43(4)：642-654.

[2] 王 宇，肖 迪，牛洋洋，等. 基于光频域反射仪的光纤水听器探头结构形变研究[J]. 光学学报，2023，43(5)：242-250.
Wang Yu，Xiao Di，Niu Yangyang，et al. Structural deformation of fiber optic hydrophone probe based on optical frequency domain reflectometry[J]. Acta Optica Sinica，2023，43(5)：242-250.

[3] 杨濠琨，尤 贺，贺 静，等. 机器人柔性触手形状的光纤传感及重构方法[J]. 激光与红外，2020，50(10)：1246-1252.
Yang Haokun，You He，He Jing，et al. Optical fiber sensing and reconstruction method for flexible tentacle shape of robot [J]. Laser & Infrared，2020，50(10)：1246-1252.

[4] 尹国路，徐 州，朱 涛. 光纤形状传感器封装过程中残余应力的分布式实时监测[J]. 光学学报，2022，42(16)：30-36.
Yin Guolu，Xu Zhou，Zhu Tao，et al. Distributed real-time monitoring of residual stress during packaging process of optical fiber shape sensor[J]. Acta Optica Sinica，2022，42(16)：30-36.

[5] Moore J P，Rogge M D. Shape sensing using multi-core fiber optic cable and parametric curve solutions[J]. Optics Express，2012，20(3)：2967-2973.

[6] 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 Xiaopin，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.

[7] 张俊康，李 红，孙广开，等. 柔性蒙皮形状监测的光纤光栅传感及重构方法[J]. 传感器与微系统，2018，37(10)：19-21，24.
Zhang Junkang，Li Hong，Sun Guangkai，et al. FBG sensing and reconstruction method for flexible skin shape monitoring [J]. Transducer and Microsystem Technologies，2018，37(10)：19-21，24.

[8] 章亚男，范 迪，沈林勇，等. FBG 细径形状传感器的应变传递和精度实验[J]. 光学精密工程，2019，27(7)：1481-1491.
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.

[9] 张冬伟，金 靖，朱云鸿，等. FBG 形状传感器应变传递与传感性能研究[J]. 半导体光电，2020，41(6)：833-838，844.
Zhang Dongwei，Jin Jing，Zhu Yunhong，et al. Research on strain transmission and sensing performance of FBG shape sensor[J]. Semiconductor Optoelectronics，2020，41(6)：833-838，844.

[10] 吕安强，黄崇武，乐彦杰，等. 基于分布式应变的三芯光纤形态重构算法研究[J]. 光电子·激光，2021，32(7)：784-790.
Lv Anqiang，Huang Chongwu，Le Yanjie，et al. Research on morphology reconstruction algorithm of three-core fiber based on distributed strain[J]. Journal of Optoelectronics·Laser，2021，32(7)：784-790.

[11] 郭永兴，杨跃辉，熊 丽. 双交的光纤布拉格光栅柔性形状传感技术[J]. 光学精密工程，2021，29(10)：2306-2315.
Guo Yongxing，Yang Yuehui，Xiong Li. Double-layer orthogonal fiber Bragg gratings flexible shape sensing technology[J]. Optics and Precision Engineering，2021，29(10)：2306-2315.

[12] Pauer H，Ledermann C，Tuschmann W，et al. Non-linear compensation of production inaccuracies and material drift by adjusting the sensor data fusion algorithms for shape sensing based on FBG-optical fibers [C]// 2014 International Conference on Multisensor Fusion and Information Integration for Intelligent Systems (MFI)，2014：1-5.

[13] Jin J，Zhang Y，Zhu Y，et al. Analysis and correction method of axial strain error in multi-core fiber shape sensing [J]. IEEE Sensors Journal，2020，20(21)：12716-12722.

[14] 吕佳豪，董明利，何彦霖，等. 引入曲率与角度校正的柔性机构三维形状多芯光纤重构方法[J]. 红外与激光工程，2021，50(5)：120-126.
Lv Jiahao，Dong Mingli，He Yanlin，et al. Three-dimensional shape multi-core fiber reconstruction method of flexible mechanism by introducing curvature and angle correction[J]. Infrared and Laser Engineering，2021，50(5)：120-126.

[15] Tan T，Xie Y L，Duan C，et al. Self-calibration method of optical fiber shape sensor placement angle deviation based on GA[J]. Measurement，2022，202：111844.

作者简介：

尚秋峰(1968—)，女，河北省保定市人，博士，教授，主要研究方向为光电子与光传感。