

非正交 FBG 柔杆空间形状重构误差分析及标定*

娄小平¹, 陈仲卿¹, 庄 炜^{1,2}, 祝连庆¹

(1. 北京信息科技大学 光电信息与仪器北京市工程研究中心 光电测试技术北京市重点实验室 北京 100016;

2. 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院 合肥 230009)

摘要:为了提高 FBG 柔杆空间形状感知系统的重构精度,提出了一种利用 3 根 FBG 阵列、具有温度补偿特性的非正交 FBG 柔杆检测方法。在分析传感系统的误差组成、产生原因的基础上,建立仿真模型得到了各组成误差分别对系统空间形状重构精度的影响,得出减小安装角度误差是提升精度的关键。利用待标定参数与标定方向与实际检测方向夹角大小相关的原理,给出了一种修正安装角度误差的标定方法。经过实验证明,该方法使得系统形状重构最大相对误差降为 0.25%,为高精度的三维形状感知系统提供了可靠的检测方法。

关键词: 光纤光栅;非正交曲率;形状重构;标定误差;标定方法

中图分类号: TP212 TH73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Error analysis and calibration for FBG shape reconstruction based on non-orthogonal curvatures

Lou Xiaoping¹, Chen Zhongqing¹, Zhuang Wei^{1,2}, Zhu Lianqing¹

(1. Beijing Key Laboratory for Optoelectronics Measurement Technology, Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China;

2. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of FBG three-dimensional shape sensing reconstruction, this paper proposes a temperature compensated detection method based on non-orthogonal curvature, utilized three FBG arrays to constitute sensor networks. Based on analysis of the system error components and the error causes, the influence of each component error on the 3D reconstruction accuracy is obtained with simulation model. The results show that the key issue to reduce the installation angle error can improve the 3D reconstruction accuracy. A new calibration method is proposed due to that the difference between the calibration direction and the installation direction brings the change of the measurement calibration parameters. The experimental results indicate that the proposed method can reduce the maximum error ratio of 3D reconstructed to 0.16%, which provides a reliable detection method for high precision 3D shape sensing system.

Keywords: fiber Bragg grating; non-orthogonal curvature; shape reconstruction; calibration error; calibration method

1 引言

近些年来智能结构研究在航天飞行器关键结构主动监测和健康评价领域获得了广泛关注和积极探索。针对未来飞行器对环境感知与外形自适应控制的需求,实现

飞行器柔性结构形态主动监控具有重要意义。其中,研究飞行器姿态以及柔性结构的实时监测技术尤为关键^[1-3]。

目前国内常用的结构监测手段主要包括压电传感器、光纤传感器及智能涂层等^[4]。而基于多路光纤光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 传感网络的结构监测技术具有

结构体积小、重量轻、测量精度高、抗电磁干扰及无源等特点^[5],又具有良好的可植入亲和性以及易于实现多路复用、构成各种形式的传感网络等优势,既可对结构进行整体和局部测量,又能够检出损伤的存在、位置和大小,因此在柔性结构的监测中获得了重点关注^[6-7]。不仅如此,基于FBG的形状传感技术近些年来也被广泛应用于内窥镜、微创手术、缝隙搜救机器人以及智能穿戴设备等领域^[8-11]。

虽然与传统的电阻应变片测量方法、视觉测量方法相比,基于FBG柔杆的形状感知方法具有较好的主动性和实时性,但精度上没有显著的优势^[12-13]。因此,研究高精度的FBG形状感知技术十分必要。上海大学提出了一种基于正交曲率的多路复用FBG阵列传感网络测量方法^[14-15],并提出了相应的优化算法^[16-17]。但由于该方法对安装精度要求太高,而人工安装方式很难避免带来误差,算法优化又具有局限性,因此提升该系统的重构精度受到了限制。

本文在此基础上提出了一种温度自补偿的非正交曲率FBG三维形状感知方法,在对系统误差进行理论分析的基础上,改进了标定方法,通过仿真和实验证明该方法可靠提升了FBG柔杆空间形状感知系统的重构精度。

2 基于非正交FBG柔杆空间形状重构系统

该系统主要包括传感与解调两个部分,其中传感部分为非正交FBG柔性杆,由柔性基材与3根FBG阵列构成,相比于两根FBG阵列互为90°的正交柔性杆,具有温度补偿的作用;解调部分由宽带光源、光开关、FBG解调仪、上位机处理及显示设备构成^[18]。

如图1所示,宽带光源发出光信号经光纤耦合器和光开关进入FBG阵列得到传感信号,传感信号经光开关和耦合器进入解调仪得到解调信号,解调信号通过数据采集模块进入上位机,上位机将解调信号重构为三维空间形状模型并显示。

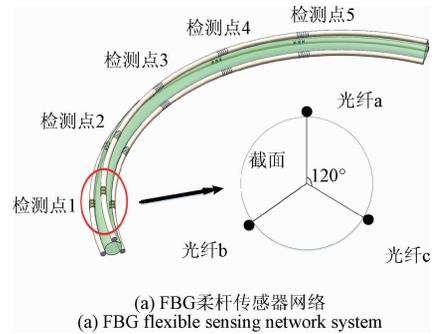


图1 FBG柔杆传感系统

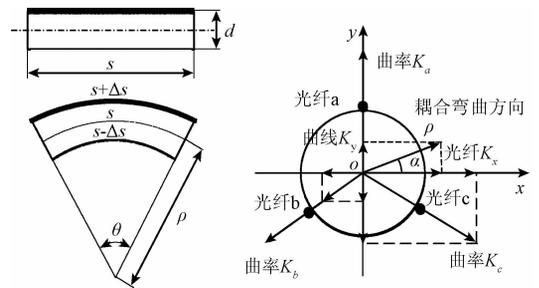
Fig. 1 Diagram of the FBG flexible sensing system

FBG柔性杆的组成结构如图2(a)所示,在柔性基材(直径为0.8 mm的钛镍合金丝)上布置一组由3根FBG

阵列串a、b、c组成的传感网络,每根FBG阵列上有5个FBG传感器,栅区长为3 mm,各检测点由3个同一位置的FBG组成,相邻FBG的位置在柔性基材的截面上的夹角互为120°,各个检测点间隔为150 mm,柔杆的总长为900 mm。



(a) FBG柔杆传感器网络
(a) FBG flexible sensing network system



(b) 空间曲率检测原理
(b) Principle of space curvature detection

图2 非正交曲率检测原理

Fig. 2 Principle of space curvature detection based on non-orthogonal distribution

非正交FBG柔性杆检测空间曲率原理如图2(b)所示。当柔杆轴向发生弯曲时,检测点FBG的栅区随着弯曲程度产生应变 ε ,反射谱中心波长 λ_B 发生漂移 $\Delta\lambda$,且漂移量与应变成正比,设栅区长度为 s ,柔杆直径为 d ,曲率半径为 ρ ,由图2(b)左可得出:

$$\theta = \frac{s + \Delta s}{\rho + \frac{d}{2}} = \frac{s}{\rho} \quad (1)$$

解得:

$$\varepsilon = \frac{\Delta s}{s} = \frac{d}{2\rho} \quad (2)$$

根据光纤光栅对轴向应变的响应公式^[5]得:

$$\Delta\lambda = (1 - P_e)\lambda_B\varepsilon \quad (3)$$

曲率 k 可由式(2)与(3)推出为:

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{2\Delta\lambda}{\lambda_B d(1 - P_e)} \quad (4)$$

图2(b)右为某检测点的截面示意图,记由纤芯中轴到光纤a的方向为理论检测方向 a ,由式(4)得到该点检

测方向 a 的曲率为 k_a , 同理检测方向 b 与 c 上曲率为 k_b 、 k_c 。规定各个检测点沿轴向指向下个检测点的方向为 z 轴正方向, 方向 a 为 y 轴正方向, 右手准则垂直于 y 轴 z 轴的方向为 x 轴正方向。则 x 轴方向上的曲率 k_x 为:

$$k_x = \frac{\sqrt{3}(k_c - k_b)}{2} \quad (5)$$

y 轴方向上的曲率 k_y 为:

$$k_y = k_a - \frac{(k_b + k_c)}{2} \quad (6)$$

耦合曲率半径 ρ 为:

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \quad (7)$$

耦合曲率与 x 轴正方向夹角 α 为:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{k_y}{k_x}\right) \quad (8)$$

由此可以测出 5 个检测点的离散曲率 k_{ix} 、 k_{iy} ($i=1, 2, 3, 4, 5$), 对数据进行插值, 可得到一组空间曲线离散点的曲率信息。

根据微分几何思想, 引进运动坐标系的概念, 建立如图 3 所示的运动坐标系, 将第 1 个检测点坐标与基坐标 F 的原点 O 重合。

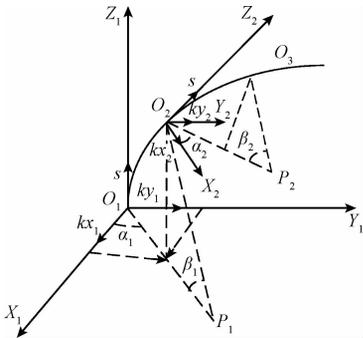


图3 空间曲线重构原理

Fig. 3 Principle of spatial curve reconstruction

设 i 点曲率半径大小为 ρ_i , 方向与 x_i 轴正方向夹角为 α_i , 已知每两个点弧线段长度为 s , 即弧角 $\beta_i = s/\rho_i$, 记 $i+1$ 点在 M_i 坐标系下的坐标为 $\{a_{i+1}, b_{i+1}, c_{i+1}\}$, 曲率半径大小为 ρ_{i+1} , 方向与 x_i 轴夹角为 α_{i+1} 。其中:

$$a_{i+1} = \rho_{i+1}(1 - \cos\beta_i)\cos\alpha_i \quad (9)$$

$$b_{i+1} = \rho_{i+1}(1 - \cos\beta_i)\sin\alpha_i \quad (10)$$

$$c_{i+1} = \rho_{i+1}\sin\beta_i \quad (11)$$

记 $\{x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1}\}$ 为 $i+1$ 在 F 中的坐标。处于运动坐标系 M_i 的第 i 点坐标转换到基坐标系 F 坐标的向量关系式为:

$$\mathbf{F} = \mathbf{T}_i \times \mathbf{M}_{i+1} \quad (12)$$

且得出各检测点在基坐标下的坐标为:

$$\begin{Bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \\ z_{i+1} \\ 1 \end{Bmatrix} = \mathbf{T}_{i+1} \begin{Bmatrix} a_{i+1} \\ b_{i+1} \\ c_{i+1} \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (13)$$

式中: 计算 \mathbf{T}_{i+1} 需要首先得到 t_{i+1} 。方法如下:

1) M_i 绕 z_i 轴旋转 α_i , 转换矩阵为 \mathbf{R}_{i1} , 产生坐标轴 x'_i, y'_i, z'_i , 则 x'_i 轴方向与 i 点耦合曲率矢量 k_i 重合;

2) 绕 y'_i 轴转过 β_i , 转换矩阵为 \mathbf{R}_{i2} , 产生坐标轴 x''_i, y''_i, z''_i , 则 z''_i 轴方向与 $i+1$ 点切线方向, 即 z_{i+1} 轴平行;

3) 绕 z_{i+1} 轴转过 α_{i+1} , 转换矩阵为 \mathbf{R}_{i3} , 使 i 点与 $i+1$ 点耦合曲率矢量平行;

4) 平移一个向量, 转换矩阵为 \mathbf{P}_i 。其中:

$$\mathbf{R}_{i1} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) & 0 & 0 \\ \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{R}_{i2} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_i) & 0 & -\sin(\beta_i) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\beta_i) & 0 & \cos(-\beta_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{R}_{i3} = \begin{bmatrix} \cos(-\alpha_{i+1}) & -\sin(-\alpha_{i+1}) & 0 & 0 \\ \sin(-\alpha_{i+1}) & \cos(-\alpha_{i+1}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{P}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{i+1} \\ 0 & 1 & 0 & b_{i+1} \\ 0 & 0 & 1 & c_{i+1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

由此得到坐标系 M_{i+1} 与坐标系 M_i 的递推矩阵为:

$$\mathbf{M}_{i+1} = \mathbf{t}_{i+1} \mathbf{M}_i \quad (18)$$

其中,

$$\mathbf{t}_{i+1} = \mathbf{P}_i \mathbf{R}_{i3} \mathbf{R}_{i2} \mathbf{R}_{i1} \quad (19)$$

根据式(12)和(18)得到:

$$\mathbf{T}_{i+1} = \mathbf{T}_i \mathbf{t}_{i+1}^{-1} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

由于检测点 1 与基坐标系原点 O 重合, 故 \mathbf{T}_1 为单位矩阵。

由此通过式(13)将 $i=1, 2, \dots, n$ 个离散空间坐标系中曲线段的点坐标依次换算到基坐标系 F 中, 则空间曲线完成重构^[8-15]。

3 传感系统中存在的误差

柔性杆靠检测杆上 FBG 的应变来计算曲率, 故检测点除弯曲外的轴向受力也将影响曲率的检测, 因此系统采用具有超弹特性的钛镍合金丝作为柔性基杆, 其弹

性模量远远大于光纤,在实验范围内可认为外应力并不造成误差。除此之外,主要的系统误差包括温度误差、安装误差以及标定误差等。

设检测信号的波长漂移 $\Delta\lambda$ 由温度漂移量 $\Delta\lambda_t$ 与应变漂移量 $\Delta\lambda_e$ 组成,则:

$$k \sim \Delta\lambda = (\Delta\lambda_t + \Delta\lambda_e) \quad (21)$$

由于各个FBG均为应变传感器,温度漂移量 $\Delta\lambda_t$ 远远小于应变漂移量 $\Delta\lambda_e$,式(21)结合式(5)和(6),温度误差在各个系数相减下大幅减少。因此需要分析并研究减小安装误差和标定误差对重构精度的影响。

3.1 安装过程中产生的误差

在制作FBG柔杆的过程中,很难保证每个检测点3个光纤光栅的实际检测方向安装相互呈120°。实际操作中安装的实际检测方向和理论方向总会有 θ 角的偏差,如图4所示。

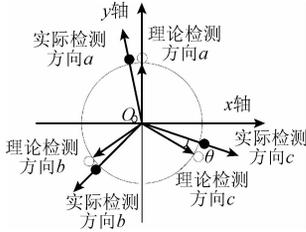


图4 安装误差

Fig. 4 Installation error

造成这部分误差的原因一般包括封装夹板本身的误差、固定夹板时产生的误差以及封装过程带来的随机误差。如图5所示,安装过程中固定夹板的位置精度受直尺的精度制约,直尺的误差为 ± 0.5 mm,夹板的直径为20 mm,如图6所示。因此带来的 θ 角误差为 $\pm 2.9^\circ$ 。

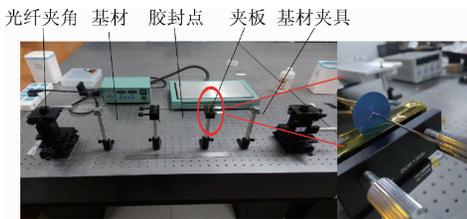


图5 FBG柔杆安装系统

Fig. 5 Diagram of FBG flexible rod installation system

传感器采用的FBG直径为0.256 mm,安装夹板的FBG入孔直径为0.3 mm。这样每个FBG安装的位置误差为 ± 0.044 mm,相对于0.8 mm直径的柔性基材,夹板带来的角度 θ 误差为 $\pm 6.3^\circ$,如图6所示。因此整个安装过程中,由于夹板本身误差以及固定位置的误差,将引起 θ 角的误差为 $\pm 9.2^\circ$ 。

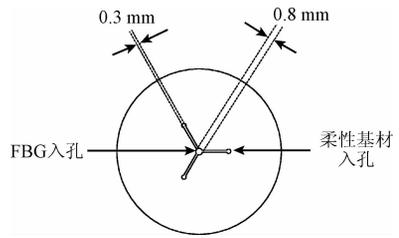


图6 夹板尺寸

Fig. 6 Size of packaging mold

建立仿真模型,采用标准螺旋线,半径15 cm,螺距10 cm,引入 $\theta = \pm 9.2^\circ$ 随机角度误差,根据图2(b)理论,式(4)中 $d_{\text{仿真}} = d_{\text{理论}} \cos\theta$,则:

$$k_{\text{仿真}} = \frac{k_{\text{理论}}}{\cos\theta} \quad (22)$$

将 $k_{\text{仿真}}$ 作为仿真输入量,重构后的形状与原螺旋线形状如图7所示,取10组仿真数据,计算重构模型中检测点与理论检测点的坐标距离,并取其均值作为各个检测点的位置误差,如表1所示。定义最大相对误差的计算方法为:

$$\kappa = \frac{\Delta d_{\text{max}}}{L} \times 100\% \quad (21)$$

式中: Δd_{max} 为最大位置误差, L 为测量曲线长度。

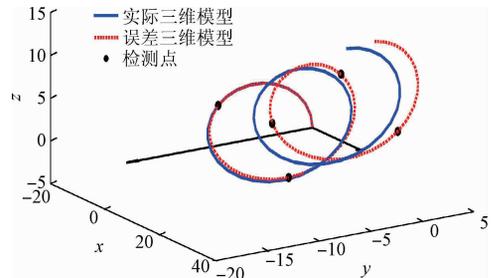


图7 安装过程产生误差对重构精度的影响

Fig. 7 The 3D reconstruction results of errors in the installation process

表1 各个检测点的安装误差

Table 1 The installation error of each monitoring point

测点	位置误差/mm	相对误差/%
1	1.49	0.17
2	4.34	0.48
3	8.78	0.98
4	13.7	1.52
5	20.74	2.30

依据重构算法,各个前置位检测点产生的测量误差都将被逐级叠加到后置位检测点上,这将造成后置检测

点误差累积,则最后一个检测点为系统最大误差位。表1中显示末置位检测点最大位置误差为20.7 mm,即安装过程产生系统最大相对误差为2.3%。

3.2 标定过程中产生的误差

FBG阵列通过环氧胶与柔性杆粘接在一起,由于应变传递效率的差异性,直接根据理论公式将带来误差,需要进行标定。根据式(4),每个FBG中心波长漂移量 $\Delta\lambda$ 与检测曲率 k 的大小呈线性关系,设应变传递系数为 η ,则比例因子 K 表达为:

$$K = \frac{2\eta}{(1 - p_c)\lambda_B d} \quad (24)$$

本系统使用的柔性杆含有15个FBG,需要依次标定出每个FBG的比例因子 K 。标定方法如图8所示,在一块金属标定板上刻上不同曲率半径的半圆弧,并将每个圆弧铣出宽度与深度均为2.5 mm的凹槽,将柔杆固定在凹槽内,转动夹板使FBG置于 y 轴正方向,即标定方向,则柔杆的弯曲方向为 y 轴负方向。标定过程中,调整夹板使柔性杆在凹槽内的角度与理论检测方向一致,测量在不同曲率半径的凹槽内中心波长的漂移量,线性拟合数据得到 K 值。

但在标定比例因子的过程中,实际检测方向与标定方向也很容易发生偏移,这将使 K 值标定产生误差。当检测方向与标定方向完全一致时,可以检测到柔杆半径为最大 R 下的参数 K_{max} ,若存在夹角 θ 时,测得值为柔杆半径 r 下的比例因子 K_θ ,如图8所示,对同一个FBG来说,根据式(24)可以推出:

$$\cos\theta = \frac{r}{R} = \frac{K_\theta}{K_{max}} \quad (24)$$

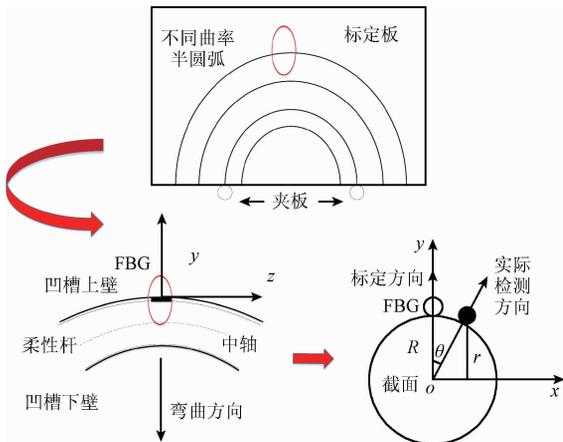


图8 标定过程中误差产生原理

Fig. 8 Calibration error in calibrating

由于 θ 存在 $\pm 9.2^\circ$ 误差,引起的 K 值误差为 $\pm 1.1\%$ 。基于最小二乘法的线性拟合也存在一定误差,如图9所示,第3检测点 a 向FBG利用最小二乘法做线性拟合得到

的 K 值,拟合优度为99%,即 K 值的标定系数存在 $\pm 1\%$ 的误差。综上所述, K 值在标定过程中的误差为 $\pm 2\%$ 。

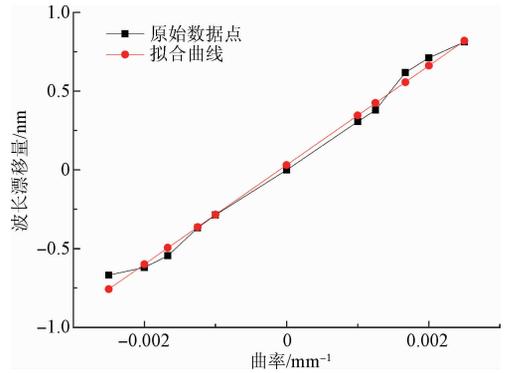


图9 第3检测点检测方向 a 上FBG标定结果

Fig. 9 Calibration results of direction a of the 3rd point

通过建立相关模型和计算,对仿真系统引进 $\pm 2\%$ 的 K 值随机误差,则重构后检测点坐标与原螺旋线坐标的位置误差如表2所示。

表2 各个检测点的标定误差

Table 2 The calibration error of each monitoring point

测点	位置误差/mm	相对误差/%
1	0.84	0.09
2	1.91	0.21
3	2.62	0.29
4	3.50	0.39
5	6.60	0.73

表2中显示末置位检测点最大位置误差为6.6 mm,即标定过程产生系统最大相对误差为0.73%。这部分误差相对安装误差较小。

4 误差修正方法及实验分析

通过理论分析和实验证明,安装过程造成的误差是影响系统重构精度的关键。为了消除安装带来的 θ 角的误差,本文提出如下的标定方法。

1)同时标定各检测点上的3个FBG的 K 值。首先将柔性杆置于最小曲率半径圆弧的凹槽内,利用夹板调整角度使柔杆检测方向 a 上FBG漂移量最大,测量此时 a, b, c 3个检测方向上FBG的中心波长;转动角度,分别使检测方向 b, c 上FBG漂移量最大,并记录该条件下 a, b, c 3个检测方向上FBG的中心波长。

2)按照步骤1)依次测量各个检测点在不同曲率半径条件下的传感信号。将各方向在不同曲率半径下最大漂移量进行线性拟合,得到 K_{amax}, K_{bmax} 与 K_{cmax} ,同理拟合

出 K_{amax} 方向下另外两个方向 FBG 的变化系数 K_{ab} 与 K_{ac} 、 K_{bmax} 方向下另外两个方向 FBG 的变化系数 K_{ba} 与 K_{bc} 、以及 K_{cmax} 方向下另外两个方向 FBG 的变化系数 K_{ca} 与 K_{cb} 。其中 K_{amax} 、 K_{bmax} 与 K_{cmax} 作为该检测点 3 个检测方向传感器的 K 值。

3) 依据式(25)可以推出:

$$\theta_{ab} = \arccos \frac{K_{ab}}{K_{amax}} = \arccos \frac{K_{ba}}{K_{bmax}} \quad (25)$$

$$\theta_{ac} = \arccos \frac{K_{ac}}{K_{amax}} = \arccos \frac{K_{ca}}{K_{cmax}} \quad (26)$$

$$\theta_{bc} = \arccos \frac{K_{cb}}{K_{cmax}} = \arccos \frac{K_{bc}}{K_{bmax}} \quad (27)$$

K_{amax} 方向下夹角 θ_{ab} 与 θ_{ac} , 则 $\theta_{bc} = 2\pi - \theta_{ab} - \theta_{ac}$, 如图 10 所示。同理依次计算 K_{bmax} 方向下和 K_{cmax} 方向下的检测方向互夹角。其中 θ_{ab} 与 θ_{ba} 在不同测量方向下可能存在差异, 因此取测量均值记为两方向的互夹角, 用算法进行修正。

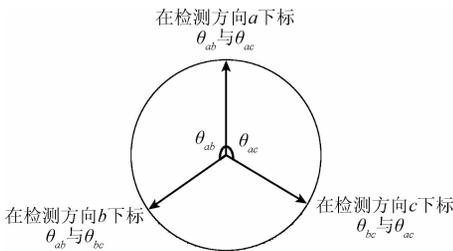


图 10 标定方法

Fig. 10 Calibration method

用该标定方法测得检测点 3 的互夹角如表 3 所示, 取均值作为该检测点 a、b、c 3 个方向的测量夹角。依次计算 5 个检测点的各个检测方向互夹角如表 4 所示。

表 3 检测点 3 三个方向互夹角标定结果

Table 3 Calibration results of three directions in point 3

方向	θ_{ab}	θ_{ac}	θ_{bc}
amax 方向	123.48°	124.27°	112.25°
bmax 方向	115.09°	120.40°	124.51°
cmax 方向	121.62°	125.56°	112.82°
均值	120.06°	123.41°	116.53°

表 4 各点 3 个方向的互夹角标定结果

Table 4 Calibration results of three directions in each point

检测点	θ_{ab}	θ_{ac}	θ_{bc}
1	121.26°	118.90°	119.84°
2	120.04°	120.08°	119.88°
3	120.06°	123.41°	116.53°
4	118.70°	125.61°	115.69°
5	115.19°	128.50°	116.31°

令各点曲率 $k = K_{max} \cdot \Delta\lambda$, 则标定 K 值的误差被减小。将式(5)修正为:

$$k_x = k_c \cos(\theta_{ac} - 90^\circ) - k_b \cos(\theta_{ab} - 90^\circ) \quad (29)$$

式(6)修正为:

$$k_y = k_a - k_c \sin(\theta_{ac} - 90^\circ) - k_b \sin(\theta_{ab} - 90^\circ) \quad (30)$$

这样安装误差也大幅减小。为了检测该标定方法的精度, 利用黑白棋盘作为模板进行实验。采用的图形为 C 型, 将长度为 900 mm 的 FBG 柔杆在棋盘内弯成不同曲率的 C 型图, 测量各个检测点在模板上的位置坐标, 与重构后的模型位置进行比较, 实验过程如图 11 所示。

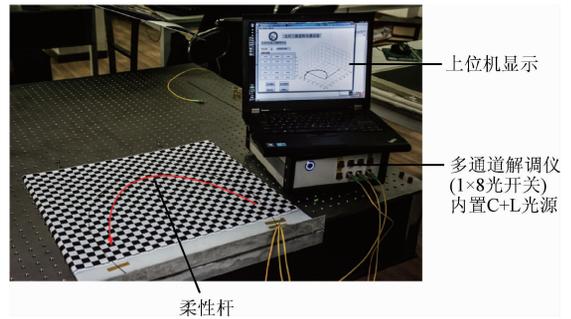


图 11 三维形状重构验证系统

Fig. 11 Experimental system of 3D shape reconstruction

在温度相对稳定的情况下, 记录 10 次数据, 计算各个检测点的位置误差、相对位置误差如表 5 所示。理想状态下, 图 11 中柔性杆的重构模型应完全处于一个二维平面上, 但由于系统存在误差, 导致各个检测点的重构位置发生偏转, 并不完全在同一平面内, 具有位置误差。表 5 中可以看到, 修正角度误差之后最大位置误差为 2.28 mm, 最大相对误差为 0.25%, 未修正角度误差时最大位置误差为 15.57 mm, 最大相对误差为 1.73%。实验证明修正安装角度误差可以显著提高系统形状重构的精度。

表 5 实测各检测点的位置误差

Table 5 The position error of each monitoring point in experiment

检测点	修正角度	修正角度	未修正角度	未修正角度
	位置误差/mm	相对误差/%	位置误差/mm	相对误差/%
1	0.21	0.02	0.65	0.07
2	0.59	0.07	1.76	0.20
3	1.12	0.12	4.48	0.50
4	1.63	0.18	8.48	0.94
5	2.28	0.25	15.57	1.73

5 结 论

在分析正交 FBG 柔杆形状感知系统误差产生机理及其对重构精度影响的基础上,提出了温度自补偿的非正交布局方式,并给出了一种减小安装误差的标定方法。这种方法有效减少了人工安装带来的安装角度误差,将总长为 900 mm 的 FBG 柔杆形状传感系统的最大位置误差降低至 2.28 mm,最大相对误差降低为 0.25%。

虽然 FBG 柔杆三维空间形状感知技术目前在理论和实践上都已取得了一定的进展,但由于未来飞行器对环境感知、反隐机制与外形自适应控制的需求,更高精度的形状感知技术将具有广阔研究前景,因此,为了进一步提高三维形状的重构精度,需要从传感器制作过程、网络布局以及标定手段上进一步挖掘。作为典型的准分布式传感测量,布局方式和布局密度也会对重构结果产生重要影响。因此 FBG 柔杆网络布局方式及完善的标定措施对高精度的形状测量有重要的科学意义和应用前景。

参考文献

- [1] PANOPOULOU A, LOUATAS T, ROULIAS D, et al. Dynamic fiber Bragg gratings based health monitoring system of composite aerospace structures [J]. *Acta Astronautica*, 2011, 69(7-8):445-457.
- [2] ELAYAPERUMAL S, PLATA J C, HOLBROOK A B, et al. Autonomous real-time interventional scan plane control with a 3-D shape-sensing needle [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2014, 33(11):2128-39.
- [3] ROESTHUIS R J, KEMP M, VAN D D J J, et al. Three-dimensional needle shape reconstruction using an array of fiber Bragg grating sensors [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(4):1-12.
- [4] 王奕首, 卿新林. 复合材料连接结构健康监测技术研究进展[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(1):1-16.
WANG Y SH, QING X L. Progress on study of structural health monitoring technology for composite joints [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(1):1-16.
- [5] 李红, 祝连庆, 刘锋, 等. 裸光纤光栅表贴结构应变传递分析与实验研究[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(8):1744-1750.
LI H, ZHU L Q, LIU F, et al. Strain transfer analysis and experimental research of surface-bonded bare FBG [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(8):1744-1750.
- [6] 易金聪, 朱晓锦, 张合生, 等. 飞行器框架模型结构振动形态感知与重构方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2013, 33(4):582-587.

- YI J C, ZHU X J, ZHANG H SH, et al. Method verification of vibration shape perception and reconstruction for aircraft frame model structure [J]. *Journal of Vibration Measurement & Diagnosis*, 2013, 33(4):582-587.
- [7] SUN B, ZHU X J, QIAO X P, et al. Analysis and design of a FBG intelligent flexible structure based on orthogonal curvatures [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2010, 39(11):67-72.
- [8] 沈林勇, 肖海, 钱晋武, 等. 智能内窥镜的形状重建和可视化方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(12):2725-2730.
SHEN L Y, XIAO H, QIAN J W, et al. Shape reconstruction and visualization of intelligent endoscope [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(12):2725-2730.
- [9] ABAYAZID M, KEMP M, MISRA S. 3D flexible needle steering in soft-tissue phantoms using fiber bragg grating sensors [J]. *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2013:5843-5849.
- [10] ALLSOP T, BHAMBER R, LLOYD G, et al. Respiratory function monitoring using a real-time three-dimensional fiber-optic shaping sensing scheme based upon fiber Bragg gratings [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2012, 17(11):345-352.
- [11] 邱亚, 沈林勇, 胡卫建, 等. 缝隙搜救机器人镜体的形状重建和定位方法[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(12):2782-2789.
QIU Y, SHEN L Y, HU W J, et al. Shape rebuilding and positioning method of search and rescue robot endoscope in ruin crack [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(12):2782-2789.
- [12] HARNETT C K. Flexible circuits with integrated switches for robotic shape sensing [C]. *SPIE Commercial Scientific Sensing and Imaging*, 2016, doi: 10.1117/12.2235356.
- [13] MOORE J P, ROGGE M D. Shape sensing using multi-core fiber optic cable and parametric curve solutions [J]. *Optics Express*, 2012, 20(3):2967-73.
- [14] YI J, ZHU X, ZHANG H, et al. Spatial shape reconstruction using orthogonal fiber Bragg grating sensor array [J]. *Mechatronics*, 2012, 22(6):679-687.
- [15] 张伦伟, 韦海峰, 郑庆华, 等. 形状记忆合金细长柔杆空间形状位置测量方法[J]. *力学季刊*, 2012, 33(1):100-105.
ZHANG L W, WEI H F, ZHENG Q H, et al. Research on spatial shape and orientation detection of a flexible shape memory alloy rod [J]. *Chinese Quarterly of*

Mechanics, 2012, 33(1):100-105.

- [16] 肖海, 章亚男, 沈林勇, 等. 光纤光栅曲线重建算法中的曲率连续化研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(5):993-999.
- XIAO H, ZHANG Y N, SHEN L Y, et al. Research on curvature serialization in the curve reconstruction algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(5):993-999.
- [17] 朱晓锦, 蒋丽娜, 孙冰, 等. 基于B样条拟合的光纤光栅机敏柔性结构形态重构[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7):1627-1634.
- ZHU X J, JIANG L N, BING S, et al. Shape reconstruction of FBG intelligent flexible structure based on B-spline fitting[J]. Optics & Precision Engineering, 2011, 19(7):1627-1634.
- [18] 李红, 祝连庆, 闫光, 等. 基于改性型UDP和CIGI的光纤光栅高速解调技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1):129-135.
- LI H, ZHU L Q, YAN G, et al. FBG high speed demodulation technology based on improved UDP and CIGI [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(1):129-135.

作者简介



娄小平, 分别在1991年和1998年于北京航空航天大学获得学士学位和硕士学位, 现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为光纤传感、光电精密测试技术等。

E-mail: louxiaoping@bistu.edu.cn

Lou Xiaoping received her B. Sc. degree and M. Sc. degree from Beihang University in 1991 and 1998, respectively. Currently, she is a professor in Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include fiber sensing technology and optical measurement technology.



祝连庆(通讯作者), 分别在1982年和1989年于合肥工业大学获得学士学位和硕士学位, 2013年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为光纤传感、光纤激光器、光电精密测试技术等。

E-mail: zhulianqing@sina.com

Zhu Lianqing (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1982 and 1989, respectively. He received his Ph. D. degree in 2013 from Harbin Institute of Technology, and now he is a professor in Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include fiber sensing technology, and fiber laser and optical measurement technology, etc.