

# 柔性蒙皮形状监测的光纤光栅传感及重构方法<sup>\*</sup>

张俊康, 李 红, 孙广开, 祝连庆

(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 100016)

**摘 要:** 为实现变形机翼柔性蒙皮形状传感监测, 提出基于光纤 Bragg 光栅( FBG )的柔性蒙皮形状传感及重构方法。理论推导出 FBG 中心波长漂移量与曲面变形角度的关系。建立柔性蒙皮形状重构仿真分析模型, 研究基于被测点曲率的曲面重构( CPR )算法。构建柔性蒙皮形状传感重构实验系统, 根据 FBG 波长漂移量计算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, 得到不同变形角度柔性蒙皮面型。实验结果表明: FBG 传感器中心波长漂移量与柔性蒙皮变形角度呈线性关系; 光纤光栅传感的曲面重构方法适用于柔性蒙皮的传感监测, 在变体飞行器变形机翼形状监测中具有应用前景。

**关键词:** 柔性蒙皮; 变形机翼; 形状监测; 曲面重构; 光纤光栅

中图分类号: TN253      文献标识码: A      文章编号: 1000-9787(2018)10-0019-03

## FBG sensing and reconstruction method for flexible skin shape monitoring<sup>\*</sup>

ZHANG Jun-kang, LI Hong, SUN Guang-kai, ZHU Lian-qing

(Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China)

**Abstract:** In order to realize shape sensing and monitoring on morphing wing flexible skin, a new method for shape sensing and reconstruction of flexible skin based on fiber Bragg grating( FBG ) is proposed. The relationship between central wavelength shift of FBG and the surface deformation angle is theoretically derived. A simulation model for shape reconstruction of flexible skin is constructed. The method of surface reconstruction based on curvature of tested point is studied. Curve planar reformation( CPR ) algorithm is used for shape reconstruction of different deformation angle of flexible skin. The curvature of the sensing point is calculated according to the wavelength shift of FBG. The surface reconstruction of and the flexible skin profiles with different deformations angles are obtained. Experimental results show that center wavelength shift value of FBG sensor is linearly related to the deformation angle of flexible skin. The surface reconstruction method for FBG is suitable for sensing monitoring of flexible skin, and it has potential applications in variant vehicle morphing wing shape monitoring.

**Keywords:** flexible skin; morphing wing; shape monitoring; curve planar reformation( CPR ); fiber Bragg grating( FBG )

### 0 引 言

飞行器的气动特性由柔性蒙皮的形状直接决定, 必须采用有效的技术方法实时监测柔性蒙皮的变形形状, 使其达到既定的变体形状和位置精度, 对保证飞机高速飞行状态下的气动特性、机动性、稳定性和安全性至关重要<sup>[1]</sup>。

作为柔性蒙皮的主要研究方向之一的柔性表层结构<sup>[2]</sup>, 就融入结构基体的分布传感技术而言, 光纤 Bragg 光栅<sup>[3,4]</sup>( fiber Bragg grating, FBG ), 构成的柔性蒙皮适用于机

翼变形物理量的实时监测, 可将光纤传感技术与面型重构方法和图形可视化技术结合起来, 根据光纤传感网络测得的飞机机翼各测点应变等物理量信息, 重构变形后的三维形状, 实时监测机翼变形姿态。

在国外, 美国 LUNA 创新公司的 Duncan R G 等人<sup>[5]</sup>利用波分复用的光纤光栅传感器阵列构建光纤全局定位系统, 实验数据表明利用光纤传感技术可以准确重构出结构的二维和三维形状, 误差值可以达到 1.2 %。Blandino J 等

收稿日期: 2017-09-11

<sup>\*</sup> 基金项目: 教育部“长江学者与创新团队发展计划”项目( IRT\_16R07 ); 光电测试技术北京市重点实验室 2017 开放课题项目( GDKF2017006 )

人<sup>[6]</sup>研究了 FBG 传感器对飞机吊杆结构弯曲形状和运动跟踪的传感。Kressel I 等人<sup>[7]</sup>将光纤光栅传感器嵌入用于临床手术的器械中,利用传感器的监测信号实现对手术器械在体内腔道中的形状和位置进行实时监测。Jutte C V 等人<sup>[8]</sup>在机翼地面载荷试验中,利用光纤光栅传感器阵列进行了全尺度机翼弯曲和扭曲形态的测量。国内,上海大学钱晋武教授课题组的邱亚等人<sup>[9]</sup>研究了利用光纤光栅传感器测量空间曲率信息进而对线性、杆形结构形态重构的方法。张合生等人<sup>[10]</sup>研究了太空柔性伸展机械臂的光纤光栅传感与重构方法。狄海廷等人<sup>[11]</sup>提出了利用环形光纤曲率传感器进行三维曲面重构的方法。与国外相比,目前我国在针对变体飞机柔性蒙皮形态的光纤传感技术方面,针对性的研究工作十分匮乏、技术差距明显,而国外一贯实行严密的技术封锁。因此,本文对硅胶板构成的变形机翼柔性蒙皮,建立机翼曲面的仿真模型,在变形机翼实验原型的基础上对柔性蒙皮变形角度进行测量。

1 形状重构原理

柔性蒙皮三维形状重构近似为空间面型的曲面重构问题。根据曲面微分几何学,曲率信息是曲线、曲面的关键表征参量,曲率和弧长信息决定的曲面的唯一形状,在实时监测时,通过 FBG 得到测量点的应变信息,进而转化为该点的曲率信息。

1.1 曲率检测原理

FBG 传感器的中心波长为

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

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。温度保持恒定时,光纤光栅受纵向拉伸或压缩作用,即其仅受轴向应变  $\varepsilon$ ,光栅周期  $\Lambda$  将会改变,此时中心波长会发生漂移  $\Delta\lambda_B$  为  $\Delta\lambda_B = \lambda_B \cdot (1 - P_e) \cdot \varepsilon$ ,  $P_e$  为光纤的弹光系数。FBG 的被测点可以建模为圆形截面的变形梁,当对其施加一个轴向应变时,变形梁上下表面会同时承受拉伸和压缩,会形成一个圆弧,如图 1 所示。在变形弯曲变形区内,在缩短和伸长的两个变形区之间,应变中性层的长度始终不变,即应变量为 0。图中虚线表示中性层,  $L$  为微元长度,  $\Delta L$  为结构微元长度的变化量,  $\rho$  为曲率半径,  $\theta$  为圆弧的圆心角<sup>[12]</sup>。

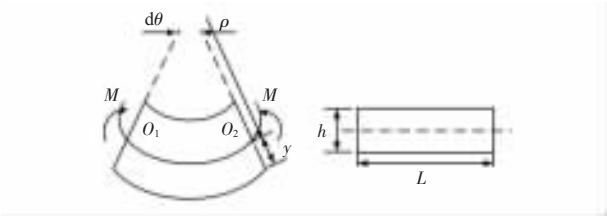


图 1 曲率推导模型

由图 1 所示关系推导得  $L = \rho\theta$ ,  $L + \Delta L = (\rho + h/2)\theta$ , 则,微元的曲率为  $k = \frac{1}{\rho} = \frac{2}{h} \frac{\Delta L}{L} = \frac{2}{h} \varepsilon$ ,  $\varepsilon = \Delta L/L$  为应变。

万方数据

那么,FBG 的中心波长的漂移转化为曲率的变化

$$k = \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B \cdot (1 - P_e) \cdot h} = A\Delta\lambda_B \tag{2}$$

对于 FBG 传感器,  $\lambda_B$ ,  $h$ ,  $\Delta\lambda_B$ ,  $P_e$  均为常量,因此式(2)中  $A$  为常数,曲率  $k$  的大小与  $\Delta\lambda_B$  呈线性关系,只要检测 FBG 传感器测点的中心波长变化量  $\Delta\lambda_B$  即可获得  $k$  的大小,为基于曲率信息的机翼原型曲面重构算法提供基础数据。

1.2 曲面重构算法

将曲面离散为多条平面曲线,首先完成曲面上多条曲线的重构,然后通过  $B$  样条插值的数值计算方法实现曲面重构。

如图 2 所示为蒙皮上的微元,设两个端点为  $A, B$ ,且两点间的距离已知,  $AB$  为无弯曲状态,当发生弯曲后,  $B$  运动至  $B'$  点,  $\widehat{AB}$  的圆心角  $\phi_1 = |AB| \cdot k$ , 则  $B'$  点的坐标由  $B$  点坐标旋转  $\phi_1$  后得到,数学关系为

$$\begin{pmatrix} B'_x \\ B'_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \phi_1 & -\sin \phi_1 \\ \sin \phi_1 & \cos \phi_1 \end{pmatrix} \tag{3}$$

此时,坐标系变为  $x'z'$ ,在  $x'z'$  坐标系下同样利用旋转坐标的方法得到  $C$  点坐标,此时旋转角为  $\phi_2$ 。将所得坐标旋转  $-\phi_1, -\phi_2, \dots$  再减去平移向量  $\overrightarrow{AB'} \rightarrow, \overrightarrow{B'C} \rightarrow, \dots$ , 以此类推得到曲线上所有点的坐标,即实现由旋转坐标系下坐标向原始坐标系转换。重构出曲线后采用曲线光滑拟方法实现曲线到曲面的重构,从而实现整个机翼蒙皮形状的重构和可视化。

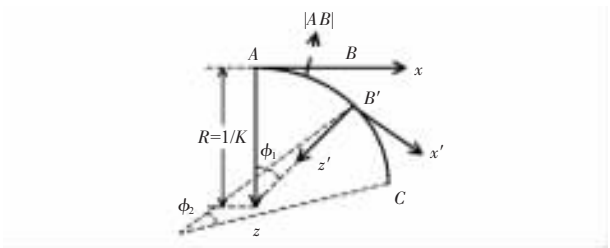


图 2 曲线上点坐标计算几何模型

图 3 为曲面变形角度计算示意,本文曲面变形角度的定义是曲面在  $xz$  平面的投影曲线末端切线与  $x$  轴的夹角,即图中两个虚线的夹角。图中曲线  $C$  为曲面在  $xz$  平面内的投影,则曲面的变形角度为  $\theta = \alpha + \Delta\alpha$ 。

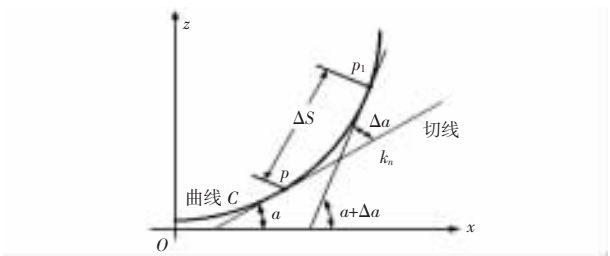


图 3 曲面变形角度计算示意

2 实验系统设计

采用一台 ASE 宽带光源作为试验用光源,光源为 c 波段:1530~1565 nm;采用实验室紫外刻写的光纤光栅作为传感器,FBG 波长为:1 536. 53,1 539. 76,1 544. 25,1 546. 33,1 557. 37,1 561. 43 nm;采用一台笔记本电脑作为上位机,用来显示柔性蒙皮面型重构结果;采用一台实验室自主研制解调仪作为实验的解调装置,解调仪 CCD 像素为 512,解调速率最高可达 17 kHz,实验用解调速率为 100~200 Hz,保证动态实时显示结构形态和准确定位。采用自主设计的柔性机翼原型作为实验对象,翼梁材质为钢,翼肋材质为航空专用铝合金,机构变形的驱动为电机驱动。采用上海力全橡塑有限公司生产的硅胶薄板作为柔性蒙皮的材料,硅胶薄板的厚度为 0. 05 mm。

将两块硅胶用道康宁 732 单组份多功能密封橡胶粘起来,然后将光纤光栅传感器夹在两块硅胶中间。以此保证柔性蒙皮的变形能够更好地传递到传感器,布局方式为:传感器之间间隔 10 cm,沿机翼弦向变形方向等间距布设,保证柔性蒙皮变形时产生的弯曲变形方向与 FBG 轴向感知方向一致。

柔性蒙皮曲面重构过程原理如图 4 所示,状态一为蒙皮初始状态下的平面,状态二为蒙皮变形后的曲面,由状态一到状态二过程中,FBG 传感器拉伸,中心波长漂移,解调仪解调出中心波长的漂移量,利用曲面拟合程序将中心波长的漂移量计算为每个点坐标值,最后在坐标系中拟合出蒙皮变形后的曲面。

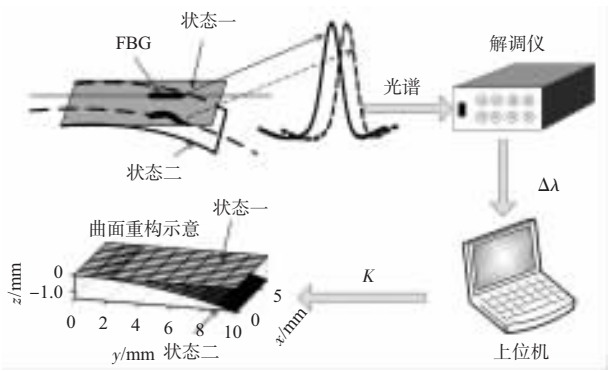


图 4 曲面重构过程原理

3 仿真分析

通过实验标定出 FBG 与硅胶板粘贴时应变系数,构建柔性蒙皮仿真模型,验证柔性蒙皮曲面重构算法的可行性。

建立的硅胶蒙皮模型尺寸为 40 mm×10 mm,蒙皮厚度为 1 mm,曲面变形角度与被测点曲率的关系为变形角度为-30°,10°,20°,30°时,对应曲率分别为-1. 047 2,0. 349 1,0. 698 1,1. 047 2。在 MATLAB 中将曲面的变形角度对应的曲率作为输入,利用曲面重构算法及可视化技术对曲面进行重构,图 5 为对应的仿真曲面。

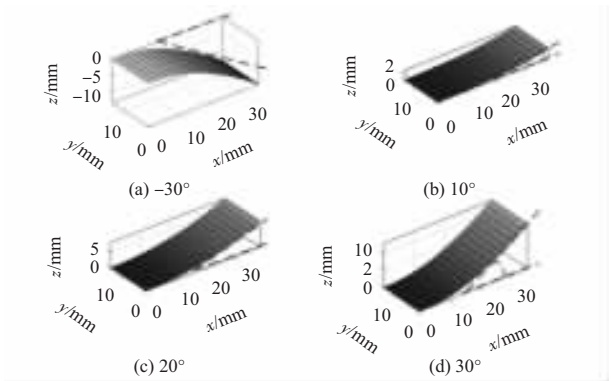


图 5 不同变形角度曲面重构仿真

4 实验与结果分析

柔性蒙皮形状重构实验系统驱动器为步进电机,电机减速比为 1:90,通过电机控制器控制输出脉冲进而控制步进角,变形机翼采用 4 轴旋转结构,第 1 个轴为固定轴,通过调节另 3 个驱动轴转动不同的角度实现机翼的变形,机翼带动柔性智能蒙皮变形。解调仪将 FBG 的中心波长上传给上位机,解算波长漂移量,换算为被测点的曲率信息,由曲面重构算法重构翼面形状。

实验过程中柔性智能蒙皮的变形角度为 15°,30°,分析可知:当柔性蒙皮变形角度增加时,FBG 中心波长红移,当变形角度减小时,FBG 中心波长蓝移,但不同位置传感器漂移量不相同,如图 6 所示,因为变形机翼变形时不同的旋转轴旋转角度不相同,导致不同位置的传感器的变形量不相同;由分析可知,柔性蒙皮变形角度与 FBG 传感器中心波长漂移量呈线性关系。

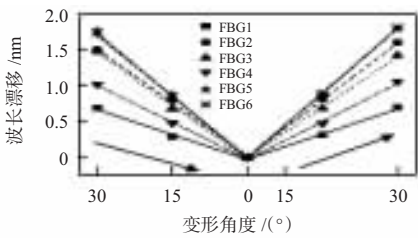


图 6 不同位置 FBG 波长漂移量与变形角度的关系

5 结 论

1)基于曲率的曲面重构算法实现柔性蒙皮的曲面重构具有可行性,为变形机翼柔性蒙皮监测的实现奠定了理论基础。

2)柔性蒙皮曲面监测时 FBG 传感器中心波长漂移量与柔性蒙皮变形角度呈线性关系,且与被测点的位置有关系,在布置传感器时要考虑被测点的变形能够被 FBG 监测且未超出 FBG 的最大测量范围。

3)基于光纤光栅的柔性蒙皮曲面重构方法适用于变形机翼蒙皮的监测,但曲面重构算法还需要进一步优化,由于实验条件所限对于柔性蒙皮的重构精度还需进一步提高。

( 下转第 24 页 )

法仍可较为准确地重建出癌变组织位置,其中含先验信息的 EKF 算法重建图像伪影更小。对模型 3,CG 算法已发生严重形变,无法分开左肺中的 2 个癌变组织,但 EKF 算法和含先验信息的 EKF 算法仍可较为准确地重建出癌变组织位置,可以分隔开左肺的 2 个癌变组织,但右肺的成像也与真实形状相差较大,比较 2 种方法,含先验信息的 EKF 算法的伪影更小。

为定量比较重建图像的质量,采用图像相对误差  $e$  作为评价参数

$$e = \frac{\|g - \hat{g}\|_2}{\|g\|_2} \quad (7)$$

式中  $g$  为真实的癌变组织电导率,  $\hat{g}$  为重建的癌变组织电导率分布。

经计算 3 种模型中含先验信息的 EKF 方法图像的相对误差最小,说明其重建图像质量最好。其中 CG 算法与其他 2 种方法的相对误差值相差较大,说明 CG 算法重建图像质量最差。对模型 3,癌变组织较多时,含先验信息的 EKF 方法较 EKF 方法的误差更小,重建图像质量更好。

### 3 结 论

利用人体胸腔器官分布结构和器官组织电导率等先验信息建立正则化矩阵,并将正则化项引入 EKF 中,进行肺癌组织的图像重建。仿真实验表明:与共轭梯度算法和传统的 EKF 算法相比,含先验信息的 EKF 算法得到的重建图像相对误差更小,图像质量更好。

### 参考文献:

- [1] 徐灿华,董秀珍.生物电阻断层成像技术及其临床研究进展[J].高电压技术,2014,40(12):3738-3745.

(上接第 21 页)

### 参考文献:

- [1] 孙侠生,肖迎春.飞机结构健康监测技术的机遇与挑战[J].航空学报,2014,35(12):3199-3212.
- [2] 程春晓,李道春,向锦武,等.柔性后缘可变形机翼气动特性分析[J].北京航空航天大学学报,2016,42(2):360-367.
- [3] 胡 鹏,王召巴,张东利.大量程涡流测距探头的仿真设计[J].传感器与微系统,2012,31(8):103-106.
- [4] 曹 敏,王 恩,李 博,等.FBG 应变传感器标定过程中的不确定度研究[J].传感器与微系统,2016,35(9):30-32.
- [5] Duncan R G, Froggatt M E, Kregar S T, et al. High-accuracy fiber-optic shape sensing[J]. Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2007, 6530: 65301S-1-65301S-11.
- [6] Blandino J, Mcdevitt M, Mueller J, et al. Characterization of dryout point in the vaporizing liquid microthruster[J]. Journal of Propulsion & Power, 2006, 22(3):677-683.
- [7] Kressel I, Dorfman B, Botsev Y, et al. Flight validation of an embedded structural health monitoring system for an unmanned aerial vehicle[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(7):

- [2] Raneta O, Bella V, Bellova L, et al. The use of electrical impedance tomography to the differential diagnosis of pathological mammographic/sonographic findings[J]. Neoplasma, 2013, 60(6):647-654.
- [3] Vongerichten A, Santos G, Avery J, et al. Electrical impedance tomography(EIT) of epileptic seizures in rat models—A potential new tool for diagnosis of seizures[J]. Clinical Neurophysiology, 2014, 125(1):282-283.
- [4] 王化祥.电学层析成像[M].北京:科学出版社,2013:59-60.
- [5] Dehghani H, Barber D C, Basarab-Horwath I. Incorporating a priori anatomical information into image reconstruction in electrical impedance tomography[J]. Physiological Measurement, 1999, 20(1):87-102.
- [6] Vauhkonen M, Vadasz D, Karjalainen P A, et al. Tikhonov regularization and prior information in electrical impedance tomography[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1998, 17(2):285-293.
- [7] 范文茹,王化祥,马雪翠.基于先验信息的肺部电阻抗成像算法[J].中国生物医学工程学报,2009,28(5):680-685.
- [8] 赵 琳.非线性系统滤波理论[M].北京:国防工业出版社,2012:52-54.
- [9] Kim K Y, Kim B S, Kim M C, et al. Image reconstruction in time-varying electrical impedance tomography based on the extended Kalman filter[J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12(8):1032-1039.
- [10] 张立峰,李 佳,田 沛. Kalman 滤波在电容层析成像图像重建中的应用[J].计量学报,2017,38(3):315-318.

### 作者简介:

李 佳(1990-),女,博士研究生,主要研究方向为多相流参数测量研究,电学成像技术。

075022.

- [8] Jutte C V, Kota S. Design of single, multiple, and scaled nonlinear springs for prescribed nonlinear responses[J]. Journal of Mechanical Design, 2010, 132(1):011003.
- [9] 邱 亚,深林勇,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.
- [10] 张合生,朱晓锦,李 丽,等.基于二维曲率数据的空间曲面形态重构算法[J].应用基础与工程科学学报,2015(5):1035-1046.
- [11] 狄海廷,付宜利.利用光纤曲率传感器重建三维曲面结构[J].光学精密工程,2010,18(5):1092-1098.
- [12] 易金聪.基于 FBG 传感阵列的智能结构形态感知与主动监测研究[D].上海:上海大学,2014:45-47.

### 作者简介:

张俊康(1993-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤光栅刻写与传感,柔性智能蒙皮,E-mail: zjk10048023@163.com.

祝连庆(1963-),男,通讯作者,教授,博士研究生导师,主要从事光纤传感与激光器、精密测量与系统的工作,E-mail: zhulianqing@sina.com.