

文章编号 1004-924X(2011)07-1627-08

基于 B 样条拟合的光纤光栅机敏柔性结构形态重构

朱晓锦*, 蒋丽娜, 孙冰, 张合生, 易金聪
(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要:研究了细长机敏柔性结构的三维形态拟合与重构方法以实现高性能飞行器结构形态主动监测。首先,介绍 B 样条曲线拟合基本原理,分析基于正交曲率信息的空间三维曲线重构算法和实现步骤,并进行了数值仿真分析;构建了机敏结构模型和实验环境,基于 Visual C++ 平台和 OpenGL 技术开发了可视化软件;然后,描述正交分布式光纤光栅传感阵列曲率检测方法,分析与验证了实验模型结构的三维空间形态拟合与重构实验;最后,采用 B 样条与线性插值两种拟合算法分别对半径为 50 cm 的标准圆形态进行坐标拟合和对比。实验结果表明,B 样条拟合算法具有更好的拟合重构效果,其拟合坐标标准差是线性插值拟合算法的 40%。光纤光栅机敏柔性结构空间形态重构与可视化效果良好,验证了 B 样条拟合算法的高精度和低误差特性。

关键词:B 样条拟合;机敏柔性结构;正交空间曲率;曲线拟合与重构;光纤光栅传感阵列

中图分类号:TN253;TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111907.1627

Shape reconstruction of FBG intelligent flexible structure based on B-spline fitting

ZHU Xiao-jin*, JIANG Li-na, SUN Bing, ZHANG He-sheng, YI Jin-cong

(School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

* Corresponding author, E-mail: mgzhuxj@shu.edu.cn

Abstract: Three-dimensional curve fitting and reconstruction of an intelligent structure shape were researched to implement the active monitoring for a high-performance aircraft structure shape. Firstly, the B-spline curve fitting method and recursive algorithm for coordinate fitting were introduced, and algorithm processes and implementation steps as well as numerical simulation analysis were presented. Then, a flexible structure model and its experimental environment were established, and visualization software was developed based on the Visual C++ and OpenGL technology. Furthermore, the curvature detection principle of the orthogonal distributed Fiber Bragg Grating (FBG) sensor array was demonstrated, subsequently, the three-dimensional space shape fitting and reconstruction of the experiment model structure were analyzed and verified. Finally, B-spline fitting algorithm and linear interpolation algorithm were adopted separately to construct a standard circle with the radius of 50 cm. Experimental results show that B-spline fitting algorithm has better graphical reconstruction effects comparing with linear interpolation algorithm, and its standard deviation is 40% that of linear interpola-

收稿日期:2010-07-23;修订日期:2010-12-17.

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划资助项目(No. 90716027);上海市教委科研创新重点项目(No. 09ZZ88)

tion. As the FBG intelligent flexible structure shows the better shape reconstruction and visualization, it verifies the high precision and low error characteristics of the B-spline algorithm.

Key words: B-spline fitting; flexible intelligent structure; orthogonal spatial curvature; curve fitting and reconstruction; FBG sensor array

1 引言

当前,智能或机敏结构研究获得了广泛关注和积极探索,尤其在航空航天器关键结构主动监测和健康评价领域,基于分布植入式的机敏材料与结构基体集成或融合,从而构成融入式传感网络实现结构机敏化的研究十分活跃。基于(Fiber Bragg Grating, FBG)光纤光栅传感网络与基体结构复合,通过获取结构形变分布传感曲率信息,并结合相关信号处理方法和拟合重构算法以及计算机图形处理技术,可以实现光纤光栅机敏柔性结构形态变化的感知与三维重构及现场可视化显示,其中高效精确的结构形态三维拟合与重构方法是研究的核心内容之一。

国内外近年来对基于结构形变传感曲率信息实现结构形态变化的检测和拟合重建进行了积极的方法研究和技术探索,并取得了一定的研究进展和成果。如文献[1-3]进行了光纤光栅传感器在智能结构振动检测中的应用,文献[4-5]开展了光纤光栅传感阵列面向柔性曲面振动形态检测以及内窥镜形状感知的研究;在曲线拟合与形态重构方法上,文献[6]基于微分几何运动坐标系描述了一种空间曲线拟合重构方法,文献[7]提出基于曲率信息的平面曲线表示形式,文献[8]提出空间曲率检测方法以及相应误差分析,文献[9-10]采用样条拟合方法进行曲线插值;同时,基于 OpenGL 技术进行现场可视化显示也构成了技术实现方向^[11]。但上述相关研究一般是实现静态或准动态的空间曲线拟合与重构,且所拟合对象的位置相对固定,同时部分研究侧重于理论方法分析与仿真验算,研究背景不甚明确且缺少实际结构模型验证。目前,面向航空航天器关键结构形态变化主动监控,进行光纤光栅机敏柔性结构形态实时感知和重构的研究尚不多见。

本文以高性能飞行器若干关键结构形态变化的主动监测为研究背景,面向一种拟嵌入研究模型飞行器龙骨的光纤光栅柔性细长机敏结构,基

于样条插值方法研究了面向正交空间曲率信息分布的机敏柔性结构的形态三维拟合与重构方法,以及相关可视化技术。研究过程涉及样条函数的离散曲率连续化和拟合方法,以及基于正交曲率信息的空间三维曲线重构算法,并依据研究目的进行了仿真分析;在此基础上,结合一种细长柔性机敏实验结构和所开发的软件环境进行实验分析与验证;研究结果表明,相关技术方法具有良好的重构精确度和可视化验证效果。

2 B 样条曲线拟合插值方法

一般来说,曲率连续化插值方法有多种,如线性插值、多项式插值及样条拟合插值;其中样条拟合插值的主要优点是,可用幂次较低的多项式函数来获得插值的高阶精确性,拟合曲线在各点光滑连续,较之于线性插值方法,可有效减少拟合误差,并且不受曲线弯曲复杂度的影响,插值效果一般较其他插值方式为优。B 样条曲线拟合插值原理的基本过程,可简述如下。

若存在结点向量 $\mathbf{T} = (t_0, t_1, t_2, \dots)$ 以及 $(L+1)$ 个控制点 P_k , 设 B 样条函数的阶数为 m (B 样条的次数为 $m-1$), 那么样条曲线的坐标位置可表示为式(1):

$$P(t) = \sum_{k=0}^L P_k N_{k,m}(t). \quad (1)$$

B 样条函数 $N_{k,m}(t)$ 的基本公式如式(2)所示:

$$N_{k,m}(t) = \begin{cases} \left(\frac{t-t_k}{t_{k+m-1}-t_k} \right) N_{k,m-1}(t) + \\ \left(\frac{t_{k+m}-t}{t_{k+m}-t_{k+1}} \right) N_{k+1,m-1}, \end{cases} \quad (2)$$

当阶数为 1, 即 $m=1$ 时, B 样条函数式 $N_{k,1}(t)$ 只在区间 (t_k, t_{k+1}) 中有意义, 且定义其值为 1; 对于其他区间, $N_{k,1}(t)$ 的值为 0。

另外, 对于 $L+1$ 个控制点的标准结点向量 m 和阶 B 样条描述如式(3)所示。

$$\begin{cases} t_i=0 & i=0,1,\dots,m-1 \\ t_i=i-m+1 & i=m,\dots,L \\ t_i=L-m+2 & i=L-1,\dots,L+m \end{cases} \quad (3)$$

需要注意的是,对于给定的 m ,必须有足够数量的控制点,这样才能有足够的“空间”容纳至少一个宽度为 1 的分段区间,因此有式(4)所示的约束条件:

$$m \leq L+1. \quad (4)$$

3 空间曲线拟合与重构

根据微分几何思想,可以引进运动坐标系的概念,在弯曲变化的曲线上建立起随曲线变化的运动坐标系 abc ,图 1 所示为在空间曲线上建立运动坐标系的示意图。

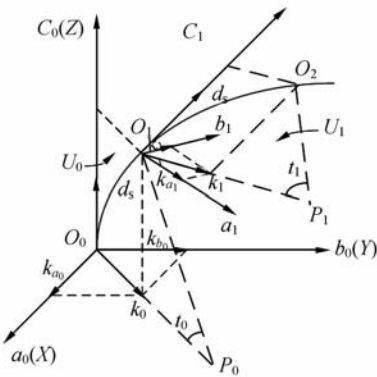


图 1 空间曲线重构示意图

Fig. 1 Diagram of space curve reconstruction

在空间曲线 $O_0O_1O_2$ 上, O_0 点是空间曲线的端点,将其作为坐标系中的原点,并以该点的切线方向为 c 轴, O 点相互正交的曲率方向为 a, b 轴,建立运动坐标系记作 M_0 。为方便计算,将固定坐标系记作 F ,它的 xyz 分别与 M_0 的 abc 重合。 k_0 是正交曲率 k_{a0} 和 k_{b0} 的合成方向,它与 c 轴构成的面为密切平面 U_0 。假设 O_0O_1 之间的弧线段极小,扭曲状态可以忽略不计,则该弧线段可看作是密切平面 U_0 上的曲线。在 O_1 点以同样的方法建立运动坐标系 $a_1b_1c_1$,将该运动坐标系记作 M_1 ;其他各点的运动坐标系可以按此方法类推。建立密切平面的意义在于它使得空间曲线上的每一个微弧段转变为在其对应密切平面上的平面曲线,即简化了空间曲线的重构过程。

由运动坐标系理论可以得知,把处在运动坐标系 M_i 的第 i 点转换到固定坐标系 F 的向量关系式,可如式(5)所示,其中 T_i 为齐次变换矩阵。

$$F = T_i M_i, \quad (5)$$

式(6)中所示 T_i 记作在第 $i-1$ 点到第 i 点的位置递推过程中变换矩阵。

$$T_i = \begin{bmatrix} a_{11_i} & a_{12_i} & a_{13_i} & a_{14_i} \\ a_{21_i} & a_{22_i} & a_{23_i} & a_{24_i} \\ a_{31_i} & a_{32_i} & a_{33_i} & a_{34_i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$\{x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1}\}$ 记作 $i+1$ 点在 F 中的坐标, $\{d_{a_{i+1}}, d_{b_{i+1}}, d_{c_{i+1}}\}$ 记作 $i+1$ 点在 M_i 中的坐标,忽略扭曲状态, $\{d_{a_{i+1}}, d_{b_{i+1}}, d_{c_{i+1}}\}$ 是密切平面 U_i 上的曲线段 $O_{i-1}O_i$ 的一点,由式(5)可得出关系式(7):

$$\begin{Bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \\ z_{i+1} \\ 1 \end{Bmatrix} = T_i \begin{Bmatrix} d_{a_{i+1}} \\ d_{b_{i+1}} \\ d_{c_{i+1}} \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

记 $i+1$ 点为 M_{i+1} 坐标系的原点, M_{i+1} 坐标系 c 轴的正方向指向曲线在 $i+1$ 点处的切线方向。忽略扭曲状态, $\{d_{a_{i+1}}, d_{b_{i+1}}, d_{c_{i+1}}\}$ 是密切平面 U_i 上的曲线段 $O_{i-1}O_i$ 的一点。把 M_i 转换到 M_{i+1} 的齐次变换矩阵记做 t_{i+1} ,三者的关系如式(8)所示。

$$M_{i+1} = t_{i+1} M_i, \quad (8)$$

其中, t_{i+1} 的变换过程可分为以下 4 个步骤:

步骤 1: M_i 绕着 c_i 轴转过 α_i , α_i 为 k_i 与 k_{a_i} 的夹角,产生 a'_i, b'_i, c'_i , 其中 a'_i 轴与 i 点的曲率矢量 k_i 方向重合,相应的齐次转换矩阵记为 R_{c_i, α_i} , 如式(9);

步骤 2: 绕着 b_{i-1} 轴转过 t_i , t_i 为该段圆弧所对应的圆心角,产生 a''_i, b''_i, c''_i , 使 c''_i 轴与 $i+1$ 点的切线方向平行,相应的齐次转换矩阵记为 R_{b_i, t_i} , 如式(10);

步骤 3: 绕着 c''_i 轴转过 $-\alpha_{i+1}$, α_{i+1} 为 k_{i+1} 与 $k_{a_{i+1}}$ 的夹角,相应的齐次转换矩阵记为 $R_{c''_i, -\alpha_{i+1}}$, 如式(11);

步骤 4: 平移一个向量,记为 P , 如式(12)。

$$\mathbf{R}_{c_i, \alpha_i} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) & 0 & 0 \\ \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\mathbf{R}_{b_i, t_i} = \begin{bmatrix} \cos(t_i) & 0 & -\sin(t_i) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(t_i) & 0 & \cos(-\alpha_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\mathbf{R}_{c_i, -\alpha_i} + 1 = \begin{bmatrix} \cos(-\alpha_{i+1}) & -\sin(-\alpha_{i+1}) & 0 & 0 \\ \sin(-\alpha_{i+1}) & \cos(-\alpha_{i+1}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_{a_i} \\ 0 & 1 & 0 & d_{b_i} \\ 0 & 0 & 1 & d_{c_i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

因此, t_{i+1} 可以表述为式(13):

$$t_{i+1} = \mathbf{P} \mathbf{R}_{c_i, -\alpha_{i+1}} \mathbf{R}_{b_i, \theta_i} \mathbf{R}_{c_i, \alpha_i}. \quad (13)$$

将坐标系 \mathbf{M}_{i+1} 转换到坐标系 \mathbf{F} 的齐次变换矩阵记做 \mathbf{T}_{i+1} , 则:

$$\mathbf{F} = \mathbf{T}_{i+1} \mathbf{M}_{i+1}. \quad (14)$$

由式(5)、式(8)和式(14)可得:

$$\mathbf{T}_{i+1} = \mathbf{T}_i t_{i+1}^{-1}. \quad (15)$$

其中, \mathbf{T}_0 为 4×4 的单位矩阵。

由以上步骤, 可以求出齐次变换矩阵 \mathbf{T}_i 转换到齐次变换矩阵 \mathbf{T}_{i+1} 的递推公式, 以及第 $i+1$ 点在固定坐标系中的值 $\{x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1}\}$ 。重复上述步骤, 就可依次求出曲线上各个点在固定坐标系中的位置, 即绝对坐标值, 从而可以实现空间三维曲线的形状重建。

4 算法仿真分析

结合所设计开发的光纤光栅(FBG)机敏柔性结构形态感知重构与可视化系统软件平台, 本文首先依照方法研究结果和算法实现过程, 侧重于 B 样条拟合曲率连续化算法与正交曲率三维曲线拟合重构方法, 以及 OpenGL 可视化技术模拟实验模型结构进行了多通道曲率信息检测和柔性结

构三维拟合重构仿真分析。软件平台显示界面上, y 轴垂直于网格面, 坐标系 xyz 符合右手法则。根据空间柔性细长机敏结构的弯曲特性, 分析过程中预置分布式正交曲率数据如表 1 所示, 图 2 所示为根据该组数据拟合重构后所获得的柔性结构三维空间重构效果图。

表 1 仿真实验分析正交曲率数据表

Tab. 1 Orthogonal curvatures used in simulation test	
$k_a [6]$	{0.004 19, 0.044 95, 0.080 30, 0.107 86, 0.119 71, 0.114 13,}
$k_b [6]$	{0.119 93, 0.111 26, 0.089 18, 0.052 60, 0.008 37, 0.037 08,}

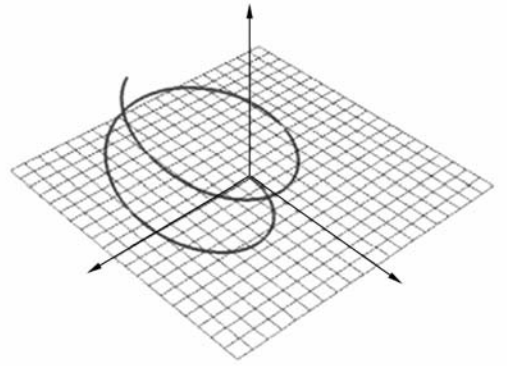


图 2 螺旋形态仿真重构效果图

Fig. 2 Spiral structure reconstruction of simulation test

在实际应用中, FBG 测量范围必须在能测量的最大压应变和最大拉应变之间, 否则将与相邻的 FBG 波长发生混叠, 甚至导致 FBG 损坏。因此图 2 所示的拟合重构效果仅作为空间曲线拟合重构算法的数值仿真验证, 实际模型结构实验中限于 FBG 调制解调仪的测量波长范围, 一般不能达到仿真分析中所获得的弯曲显示效果。

5 实验分析与验证

FBG 机敏柔性结构形态感知重构实验平台, 主要包括实验模型结构设计和制作、硬件系统构建与软件环境开发几个部分。

传感阵列是柔性机敏结构感知重构与可视化实现的重要前提。由于 FBG 比较脆弱, 工作环境下一般较易损坏, 因此必须具有可靠的封装形式。在实验模型结构制作上, 针对长度为 120 cm, 横

截面直径为 1 mm 的超弹性 (Shape Memory Alloy, SMA) 形状记忆合金丝, 将 4 根 FBG 传感阵列分布式布置在 SMA 轴向的 4 个垂直方向上; 其中, 每根光纤上有 4 个光栅点, 且光栅点是等距分布, 间距为 24 cm。具体制作方式如图 3 所示, 光纤 1 与光纤 3 在同一形变方向上, 光纤 2 与光纤 4 在同一形变方向上。

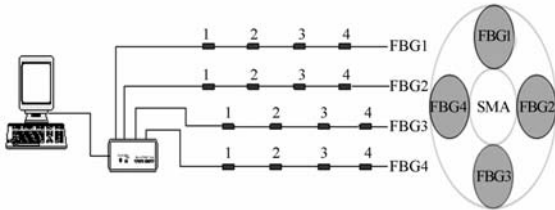


图 3 光纤光栅传感网络结构示意图

Fig. 3 Diagram of network structure for FBG sensors

硬件系统主要由高性能计算机、光纤光栅网络信号分析仪、机敏柔性细长结构曲率标定板等组成; 其中, 核心设备为上海紫珊公司 FONA-2008 型光纤光栅网络解调仪, 共具有 9 个输入通道, 各通道测量波长为 1 520~1 570 nm, 采样频率可达 250 Hz, 从而为动态实时显示结构形态和准确定位提供了有利条件。依据解调仪的技术参数以及 FBG 的最大拉伸应变极限值, 在波长测量不混叠的情况下, 设计 4 根光纤光栅传感阵列的技术参数。其中, 2 根光纤共 8 个光栅点实现同一方向 (如水平方向) 结构形变检测, 该 8 个光栅点的中心波长均不相同; 与此相似, 另 2 根光纤共 8 个光栅点实现同一方向 (如垂直方向) 结构形变检测, 该 8 个光栅点的中心波长依然均不相同, 但实现结构同一位置水平方向和垂直方向应变检测的 2 个对应光栅测点 (共有 8 组 16 个测点), 其中心波长是相同的。



图 4 实验平台示意图

Fig. 4 Diagram of experiment platform

软件环境基于 Visual C++ 平台和 OpenGL 技术进行开发, 通过分布正交 FBG 传感阵列采集获取结构的形变信息, 并基于样条插值拟合和三维空间重构算法, 实现柔性结构三维形态重建及其可视化显示。具体设计依据分布式测量数据的转化处理过程, 采用模块化设计模式, 分别考虑了数据采集模块、曲率转化模块、拟合重构模块和图形显示模块等, 以确保程序结构清晰, 执行效率高。实验平台构成如图 4 所示。

5.1 分布式曲率信息采集

基于上述实验平台, 光纤光栅解调仪在 SMA 基材的正交方向上可获得 8 组结构形变感知的波长数据。根据曲率与波长的关系式 (16), 可以计算出光纤中每个光栅点的曲率值。

$$K = \frac{\Delta\lambda_B}{(1-P)\lambda_B\gamma}, \quad (16)$$

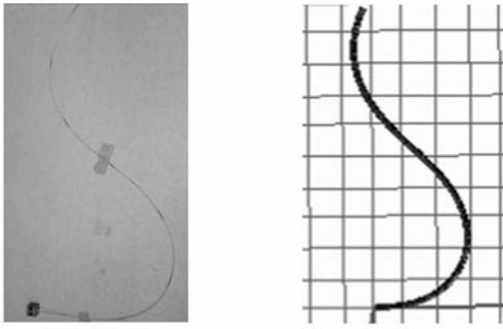
式中: K 为对应曲率, γ 为传感器安装位置到中性面距离, P 为光纤材料的弹光系数, 一般取值为 0.22; 对于确定的 FBG, λ_B 中心波长为常数, $\Delta\lambda_B$ 为波长变化量, 因此曲率与波长变化成线性关系。

实验过程中, 首先采用所设计制作的曲率标定板, 进行实验模型结构各光栅测点的曲率标定。具体标定过程如下: 使光栅点处于某个特定曲率的圆弧中, 同时利用解调仪采集此时的波长数据, 并由此得出波长差值; 重复上述过程, 得到若干组曲率-波长实验数据, 并通过最小二乘法进行最优拟合, 从而得出最佳的线性系数和相应的拟合误差。最后, 可以得到曲率转换公式 $k = p\Delta\lambda + q$ 。其中, k 为光栅点曲率值, p 为对应光栅点曲率转化系数, $\Delta\lambda$ 为对应光栅点波长变化量, q 为拟合误差。

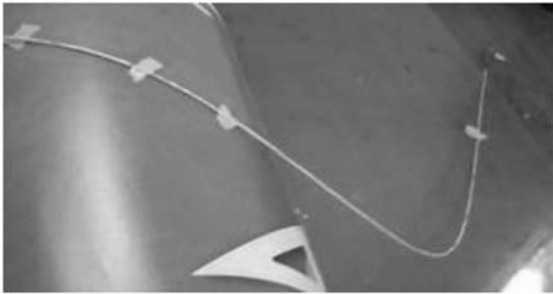
结合基于 B 样条拟合的曲率连续化算法以及基于正交曲率信息的空间曲线拟合算法, 在本文所设计开发的软件环境支持下, 得到如图 5 所示实验效果图。

5.2 样条插值效果分析与比较

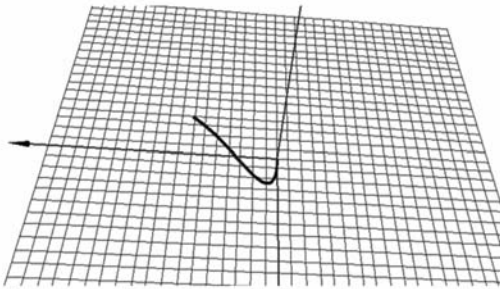
为验证拟合与重构算法过程中采用样条插值的优越性, 实验中分别利用三次样条拟合算法和线性插值算法, 对半径为 50 cm 的平面标准圆曲线进行了拟合与重建, 如图 6 所示, 同时结合 8 组光栅点位置的采集数据与实际测量数据进行比较, 并针对上述两种插值拟合算法分别进行了误



(a) 原始二维图像 (b) 拟合后二维图像
(a) Original 2D image (b) Fitted 2D image



(c) 原始三维图像
(c) Original 3D image



(d) 拟合后三维图像
(d) Fitted 3D image



(e) 实验效果图
(e) Experimental effect figure

图 5 机敏柔性结构形态重构实验效果图

Fig. 5 Experimental figures of flexible structure morphology reconstruction

差分析,具体实验数据见表 2、表 3、表 4。

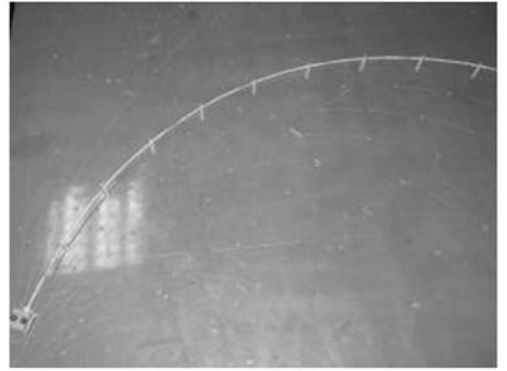


图 6 标准圆弧拟合效果分析

Fig. 6 Analysis of standard arc fitting effect

表 2 FBG 传感阵列实际采集的坐标数据

Tab. 2 Actual measured coordinates of three-dimensional curves

实际坐标	0	1	2	3	4	5	6	7
R50 X	0	11.8	23.1	33.0	41.0	46.6	49.6	49.7
Y	0	1.43	5.65	12.4	21.3	31.9	43.5	55.4

表 3 采用线性插值方法的三维曲线拟合数据

Tab. 3 Three-dimensional curve fitting data by linear interpolation

线性拟合	0	1	2	3	4	5	6	7	标准差
R50 X	0	12.4	23.5	33.3	41.2	46.6	49.3	48.3	0.205
Y	0	1.8	6.4	13.3	22.2	32.9	45.1	57.4	0.393

表 4 采用 B 样条插值方法的三维曲线拟合数据

Tab. 4 Three-dimensional curve fitting data by B-spline interpolation

B 样条拟合	0	1	2	3	4	5	6	7	标准差
R50 X	0	11.9	23.1	33.1	41.1	46.6	49.4	49.1	0.081 9
Y	0	1.4	5.5	12.1	21.0	31.6	43.3	55.2	0.076 4

表 2 给出了 8 组光栅点在半径为 50 cm 的标准圆中的实际坐标值,表 3 给出了基于线性插值方法的拟合坐标值,表 4 给出了基于 B 样条插值方法的拟合坐标值。其中,表 3 和表 4 最后一列的标准差为该坐标方向上相对误差的标准差。可以看出,基于线性插值方法的标准差分布在 0.205~0.393;基于 B 样条插值方法的标准差分布在 0.076 4~0.081 9,标准差是前者的 40%,插值精度提高 2 倍,优于线性插值方法。

由于 FBG 传感阵列的封装误差及操作误差

的存在,造成系统在采集的曲率数据中存在一些误差较大的坏值,而B样条拟合算法在全局上的控制优越性弥补了这一缺陷,它可以在曲率拟合过程中剔除一些误差较大的点,从而保证曲率的连续性,使空间曲线的平滑性得到了提高。通过对B样条插值与线性插值的拟合数据比较分析可得,基于B样条插值的拟合算法误差较小,相对误差分布在一个较小的范围内,系统的重构精度明显高于线性插值。

6 结 论

本文面向航空航天器典型结构拓扑形态的主动监测研究背景,以FBG柔性细长机敏结构为实验模型,进行了基于B样条拟合的结构空间形态重构方法的实验研究。实验结果表明,所研究的形态拟合与重构算法能够比较精确地再现实验结构空间形变状态,空间坐标拟合的标准差 <0.1 ,系统精度相对于线性插值提高了2倍,同时验证了B样条拟合插值可以有效提高重构精确度的研究思路,为课题进一步深入研究提供了有益的

方法导引和和技术指向。

同时,所做研究工作也还存在需要进一步改进之处。如当光纤光栅受到较大弯曲或应变时,依然会产生中心波长漂移现象,即啁啾现象,此时信号采集质量降低,从而导致拟合重构算法的精度下降。虽然进一步的研究工作,是将FBG机敏结构嵌入模拟飞行器龙骨框架,而该框架结构弯曲或形变状态的相对有限性,可一定程度上避免或降低啁啾现象的发生,但如何从技术方法上控制啁啾现象,依然值得深入研究和探索。

7 致 谢

本文研究工作获得国家和学校如下项目和计划的支持和资助,在此致以诚挚的感谢:国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90716027),上海市教委科研创新重点项目(09ZZ88),上海市科学技术委员会课题(08DZ2272400,09DZ2273400),上海市教委“机械电子工程”创新团队,上海市电站自动化技术重点实验室项目,上海大学“十一五”211建设计划。

参考文献:

- [1] 李丽,林玉池,付鲁华,等. 光纤光栅空分光复用传感器系统的研究[J]. 光学精密工程, 2007,15(4): 473-477.
LI L, LIN Y CH, FU L H, *et al.*. Research on spatial division multiplexing of fiber Bragg grating sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 473-477. (in Chinese)
- [2] 程淑红,李志全. 埋入式光纤光栅应变测量系统的设计[J]. 应用光学, 2007,28(5):619-622.
CHEN SH H, LI ZH Q. Design of strain in measurement system with embedded fiber Bragg grating [J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(5): 619-622. (in Chinese)
- [3] 王彦,梁大开,周兵. 光纤光栅智能结构损伤识别的小波包分析[J]. 光学精密工程, 2007,15(11): 1731-1737.
WANG Y, LIANG D K, ZHOU B. Damage diagnosis for optical fiber grating smart structure based on waved packet analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(11):1731-1737. (in Chinese)
- [4] 樊红朝,钱晋武,章亚男,等. 大型柔性曲面振动智

- 能检测[J]. 机械工程学报, 2008, 44(7):202-208.
FAN H CH, QIAN J W, ZHANG Y N, *et al.*. Vibration intelligent test of large-scale flexible surface [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008,44(7):202-208. (in Chinese)
- [5] 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 J W, ZHENG Q H, ZHANG L W, *et al.*. Deformation sensing and incremental shape reconstruction for intelligent colonoscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(5):518-524. (in Chinese)
- [6] 吴家麒,杨东英,沈林勇,等. 基于曲率数据的曲线拟合方法研究[J]. 应用科学学报, 2003, 21(3): 258-262.
WU J Q, YANG D Y, SHEN L Y, *et al.*. Research on the curve-fitting method based on curvature data [J]. *Journal of Applied Science*, 2003, 21(3):258-262. (in Chinese)
- [7] 姜献峰,孙毅. 平面曲线的曲率表示及其应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 1999,11(5):464-466.
JIAN X F, SUN Y. Curvature representation of plane curve and its application [J]. *Journal of*

Computer-aided Design & Computer Graphics, 1999, 11(5):464-466. (in Chinese)

- [8] 吴家麒, 杨东英, 钱晋武. 空间曲率检测中的标定误差分析和标定方法[J]. *光学 精密工程*, 2003, 11(2):166-170.

WU J Q, YANG D Y, QIAN J W. Calibration error analysis and way of calibration for spatial curvature measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(2):166-177. (in Chinese)

- [9] CHENG F H, WANG X F, BARSKY B A. Quadratic B-spline curve interpolation[J]. *Computers and Mathematics with Applications*, 2001, 41:39-50.

- [10] KANO H, EGERSTEDT M, NAKATA H, et al.. B-splines and control theory[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2003, 145:263-288.

- [11] CHEN B, CHENG H H. Interpretive OpenGL for computer graphics [J]. *Computers & Graphics*, 2005, 29:339.

作者简介:



朱晓锦(1965—),男,上海人,工学博士,教授,博士生导师;1985年于西安理工大学获得学士学位,1992年于同济大学获得硕士学位,1998年于南京航空航天大学获得博士学位,主要从事计算机测控技术、智能结构主动监控、自适应控制方法与信号处理等方面的研究。E-mail: mgzhuxj@shu.edu.cn



张合生(1981—),男,河南人,工程师,博士研究生,主要从事智能结构主动监控,卫星系统测控与软件平台等方面的研究。E-mail: 8103250412@sina.com



蒋丽娜(1986—),女,山东人,硕士研究生,主要从事测试计量技术与计算机图形处理的研究。E-mail: jiangln123@gmail.com



易金聪(1969—),男,福建人,副教授,主要从事计算机测控技术、信号处理、智能结构主动监控等方面的研究。E-mail: yjc_fj@126.com



孙冰(1985—),男,江苏人,硕士研究生,主要从事测试计量技术与计算机图形处理的研究。E-mail: sky_bluer@126.com