

基于多主体协作技术的光纤 Bragg 光栅传感器 网络自修复实现

张晓丽¹ 张斌² 梁大开³ 余本海¹ 李冉¹ 曾捷³ 范春风¹

¹信阳师范学院物理电子工程学院, 河南 信阳 464000

²河南机电职业学院, 河南 郑州 450000

³南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016

摘要 针对光纤布拉格光栅(FBG)传感器监测飞机机翼盒段试验件上的静态载荷,对多主体协作技术实现结构健康监测中光纤 Bragg 光栅传感器网络的自修复性进行研究。当某个主体的光纤 Bragg 光栅传感器发生故障时,首先,传感主体依据采集到的传感器信号利用支持向量回归机算法对外部载荷位置进行预测,然后系统协作主体对两个主体的预测结果进行协作,共同对故障传感器信号进行修复,最终获得损伤位置的识别结果。研究表明:多主体协作之后的损伤位置平均识别精度比单独采用任何一个主体的平均识别精度都高,可以对失效传感器信号进行一定的补偿、修复。

关键词 光纤光学;传感器;光纤 Bragg 光栅;结构健康监测;多主体;自修复

中图分类号 TP391; O43; TN711 **献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP51.060605

Self-Repairing of the Fiber Bragg Grating Sensors Based on the Multi-Agent Cooperation Technology

Zhang Xiaoli¹ Zhang Bin² Liang Dakai³ Yu Benhai¹ Li Ran¹
Zeng Jie³ Fan Chunfeng¹

¹College of Physics and Electronic Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang, Henan 464000, China

²Henan Mechanical and Electrical Vocational College, Zhengzhou, Henan 450000, China

³The State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

Abstract In view of the Fiber Bragg Grating (FBG) sensor network monitoring the static loading on the aircraft wing box test piece, self-repairability of the FBG structural health monitoring system based on multi-agent technology is studied. When partial sensors signal can't be acquired in certain agent, firstly, the support vector regression algorithm is used to predict the external loading damage position with the acquired sensor signals in each agent, and then the cooperative agent is used to cooperate each agent predicting result, so as to compensate the invalid sensor signals, thus the final predicting results are obtained for the structural health monitoring system. The research results indicate that the average predicting accuracy of the external loading position by the multi-agent technique is higher than that of any one agent, the invalid sensor signals can be compensated to some extent by the multi-agent technology.

Key words fiber optics; sensors; fiber Bragg grating; structural health monitoring; multi-agent; self-repairing

OCIS code 060.2370; 060.3735; 060.4257; 200.4560

1 引言

自20世纪80年代人们提出智能结构的概念以来,不论在土木工程还是航空航天方面,基于光纤布拉格

收稿日期: 2014-01-10; 收到修改稿日期: 2014-01-22; 网络出版日期: 2014-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(51275239, 51007002)、国家自然科学基金国际交流(51161120326)、江苏省科技支撑计划(BE2011181)、航空科学基金(20125652055, 2011ZA52013)、博士学科点专项科研基金(20123218110003)、江苏高校优势学科建设工程资助项目、河南省教育厅科学技术研究重点项目(13A510770, 12B510026)、河南省科技攻关计划(142102210482)、信阳师范学院青年骨干教师资助计划

作者简介: 张晓丽(1979—),女,博士,讲师,主要从事光纤传感网络可靠性方面的研究。E-mail: zxli_nuaa@nuaa.edu.cn

(Bragg)光栅(FBG)传感器网络的智能结构健康监测技术受到了大家的青睐^[1-2]。但目前的研究主要涉及结构损伤的定位及损伤程度的确定上,实际使用中,由于结构本身的劣化、设备的老化损害、传感器工艺及环境因素的影响,使得光纤 Bragg 光栅传感器可能出现性能退化甚至断裂。而光纤 Bragg 光栅传感器通常以串联或并联的方式埋置在被监测对象中,传感器性能退化或断裂造成的局部网络失效不仅会得到含有“病态”数据的监测结果,甚至使得位于其后的相关传感区域无法正常工作,进而导致整个光纤 Bragg 光栅智能监测系统不能正常识别损伤,这将直接影响被监测设备运行状态的监测精度和可靠性。因此研究结构健康监测中光纤 Bragg 光栅传感器网络局部失效的自修复问题引起了国内科学家的广泛关注。

目前,有关光纤 Bragg 光栅传感器网络的自修复研究主要集中在通过改变传感器网络拓扑结构或者在拓扑结构中引入光开关等方法,在传感器网络中某个节点发生故障的情况下,通过光路的切换来实现,如 Peng 等^[3-5]。国内如 Wei 等^[6]和 Zhang 等^[7]仅仅从理论方面对提出的网络自修复性进行了分析,但未从试验方面进行验证。同时,以上研究在某些传感节点发生故障的情况下,仍然会存在一些光纤 Bragg 光栅传感器信号无法通过光路切换获得的问题。

人工智能领域的多主体协作技术具有较大的灵活性,可以较容易地实现一个大型的、动态变化的系统,几个主体相互协同并解决由单一主体无法解决的困难问题,具有很强的稳健性和可靠性。在多主体技术中,每个主体能感知环境的作用并自主进行分析,与其他主体通信、共同协作完成任务^[8-9]。目前,尽管已有多篇报道了基于多主体技术的复杂结构故障诊断技术^[10-11],但大部分报道仍处于理论框架阶段,未涉及有专门针对光纤 Bragg 光栅传感器监测网络自修复方法的研究。基于以上分析,本文以一个基于支持向量回归机的飞机机翼盒段试验件健康监测试验平台为研究对象,对多主体技术用于结构健康监测系统中的光纤 Bragg 光栅传感器网络自修复性能进行了研究。

2 试验平台

结构损伤位置监测是结构健康监测的重要内容之一。神经网络、灰色系统、支持向量机是结构损伤位置监测的主要方法。其中,支持向量机(SVM)由 Vapnik 于 1995 年提出,是一种建立在 VC 维、结构风险最小化和核函数基础上的新型机器学习方法,在解决小样本、非线性及高维模式识别问题中表现出独特的优势和良好的应用前景^[12-13]。因此,采用支持向量回归机对飞机机翼盒段试验件的外部载荷损伤位置进行识别。

所采用的试验平台如图 1(a)所示。飞机机翼盒段试验件面积为 $1800\text{ mm} \times 1000\text{ mm}$,由上、下盖板组成,上盖板为铝合金板,下盖板为碳纤维材料板,且下盖板上固定有强化结构的隔板和筋条。在机翼盒段试验件上粘贴有 21 个光纤 Bragg 光栅传感器,其编号及粘贴位置如图 1(b)所示。在试验件上盖板上方安装有可移动载荷加载装置,可以对机翼盒段试验件的上表面任意位置施加集中载荷。当对试验件施加一定载荷时,试验件表面将产生应变,粘贴在试验件表面的光纤 Bragg 光栅传感器中心波长将发生偏移,通过解调仪对光纤 Bragg 光栅传感器的信号进行解调,即获得试验件中载荷位置识别所需要的数据信息。

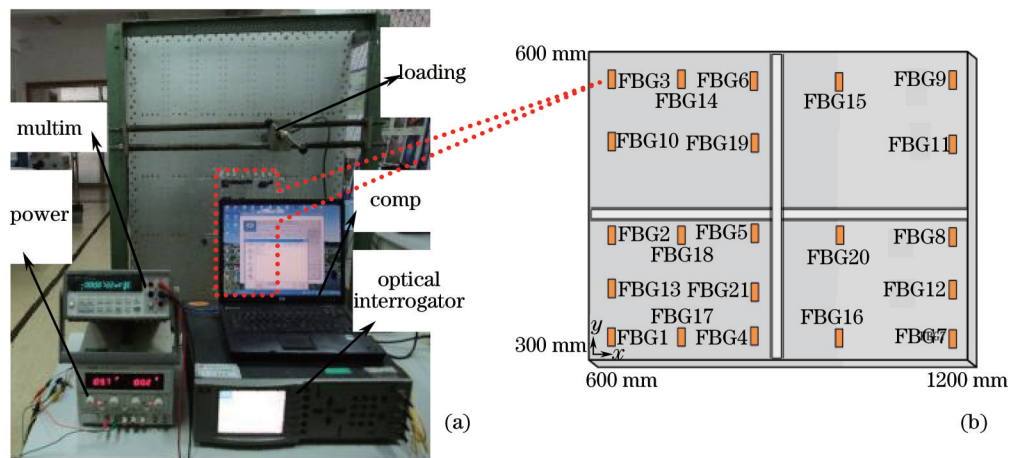


图 1 (a)多主体试验装置图; (b) 传感器排布图

Fig.1 (a) Multi-agent experimental setup; (b) arrangement of FBG sensor network

3 试验原理

3.1 系统的组成

所构建的多主体协作光纤 Bragg 光栅传感器网络自修复框架结构如图 2 所示。从图中可以看出,整个框架结构分为两层,共包含三个主体。其中,两个传感主体位于整个框架结构的底层,负责采集结构的应变信息,并采用文献[14]所述的方法对飞机机翼盒段试验件的结构损伤位置进行识别和预测。系统协作主体位于结构顶层,负责对两个传感主体的识别结果进行协作,并生成结构损伤位置的综合预测结果。

两个传感主体相互独立,拥有独立的光纤 Bragg 光栅传感器网络。传感器主体 1 中光纤 Bragg 光栅传感器网络包括 FBG1、FBG2、FBG3、FBG4、FBG5、FBG6、FBG7、FBG8、FBG9 共 9 个 FBG 传感器,传感主体 2 中光纤 Bragg 光栅传感器网络包括 FBG10、FBG11、FBG12、FBG13、FBG14、FBG15、FBG16、FBG17、FBG18、FBG19、FBG20、FBG21 共 12 个 FBG 传感器,各传感主体包括的传感器编号及网络拓扑结构如图 3 所示。

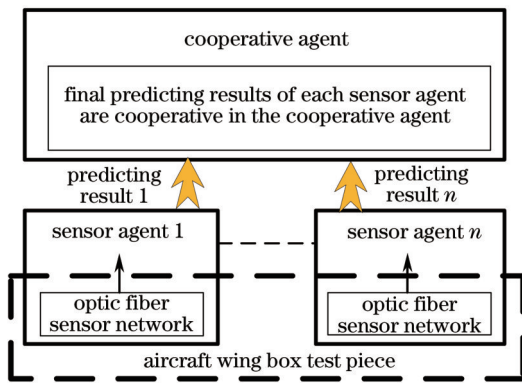


图 2 多主体协作框架结构

Fig.2 Multi-agent cooperation framework

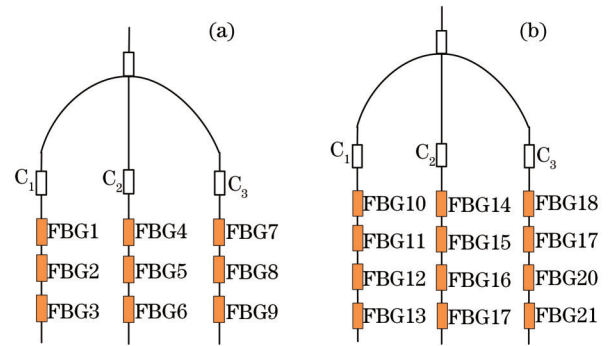


图 3 传感器编号及网络拓扑结构。(a) 主体 1; (b) 主体 2
Fig.3 Sensors number and network topology. (a) Agent1 (b) agent2

3.2 系统协作主体协作方法

信息融合是利用计算机依据一定的准则对若干传感器的信息进行分析、综合,从而完成所需要的评估和决策任务而进行的信息处理过程^[15]。通过在多主体系统中引入信息融合技术,不仅可以提高整个监测系统探测目标的识别能力,增加系统的利用率,而且可以提高整个系统的容错能力。目前,已经发展起来的信息融合算法主要有加权平均、证据推理、模糊推理、贝叶斯估计等。主要采用加权平均算法对每个主体的监测结果进行协作。

两个主体加权融合公式为

$$y_i = f(x_{1,i}, x_{2,i}) = \omega_1 x_{1,i} + \omega_2 x_{2,i}, \quad (1)$$

式中 $\omega_1 > 0$, $\omega_2 > 0$, $\omega_1 + \omega_2 = 1$, $x_{k,i} \in X_k$, $y_i \in Y$, $i = 1, 2, \dots, m$, $k = 1$ 或 2 。其中 y_i 为第 i 个监测点的融合后识别结果, $x_{1,i}$ 为主体 1 中第 i 个监测点的识别结果, $x_{2,i}$ 为主体 2 中第 i 个监测点的识别结果, ω_1 为主体 1 识别结果加权系数, ω_2 为主体 2 识别结果加权系数。

由(1)式可知,采用多主体协作的关键是确定每个主体识别结果的加权系数。两个主体识别结果加权系数是根据两个主体在训练支持向量回归机模型时的均方差值确定的。例如主体 1 在训练时的均方差为 A , 主体 2 在训练时的均方差为 B , 那么主体 1 预测结果的加权系数为

$$\omega_a = B/(A + B). \quad (2)$$

相应的主体 2 预测结果的加权系数为

$$\omega_b = A/(A + B). \quad (3)$$

4 试验结果与讨论

针对以下四种情况进行了试验研究: 1) 主体 1 完好, 主体 2 完好; 2) 主体 1 中 FBG3 故障, 主体 2 完好; 3) 主体 1 完好, 主体 2 中 FBG17 故障; 4) 主体 1 中 FBG3 故障, 主体 2 中 FBG17 故障。对于每种情况需要两个独立的支持向量回归机模型, 分别用来预测加载点 X 坐标和 Y 坐标, 因此系统中共需要训练 8 个支持向量回归

机模型,如图4所示。

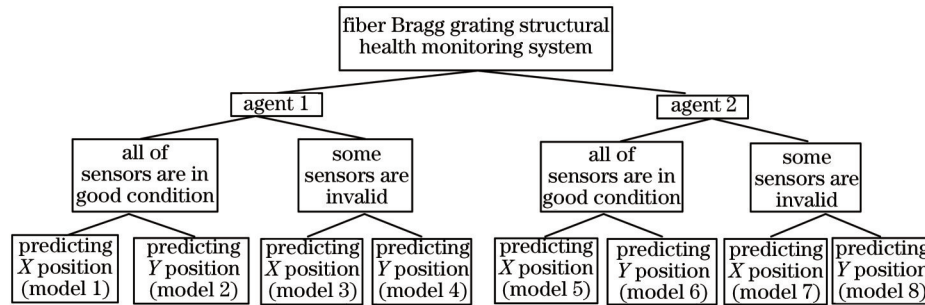


图4 多主体协作中所需支持向量回归机模型分类

Fig.4 Model classification of the SVM in structural health monitoring system

首先采用试验方法采集训练支持向量机所需的样本数据。试验时在选定试验区域选取了99个加载点,采用加载装置依次在每个加载点进行加载,加载时记录加载点坐标、加载力大小、光纤 Bragg 光栅传感器中心波长变化量。然后针对试验中的不同情况,用样本数据训练对每种情况下的支持向量回归机进行训练,相应的均方误差如表1所示。根据表1结果,按照(2)~(3)式,可计算出各种情况下主体1和主体2识别结果加权系数,如表2所示。

表1 支持向量回归机模型训练误差

Table 1 Model training error of the SVM

Model number	Model1	Model2	Model3	Model4	Model5	Model6	Model7	Model8
Mean square error /mm ²	107.02	50.17	358.96	113.65	88.35	62.95	365.67	102.14

表2 不同情况下两个主体预测结果加权系数

Table 2 Weighting coefficient of the two agents in different predicting conditions

Combination types	Agent1,Agent2 normal				Agent1 failure, Agent2 normal			
	Predictiong X position		Predictiong Y position		Predictiong X position		Predictiong Y position	
Agent name	Agent1	Agent2	Agent1	Agent2	Agent1	Agent2	Agent1	Agent2
Weight	0.452	0.548	0.556	0.444	0.198	0.802	0.356	0.644
Combination types	Agent1 normal, Agent2 failure				Agent1, Agent2 failure			
	Predictiong X position		Predictiong Y position		Predictiong X position		Predictiong Y position	
Agent name	Agent1	Agent2	Agent1	Agent2	Agent1	Agent2	Agent1	Agent2
Weight	0.774	0.226	0.671	0.329	0.505	0.495	0.473	0.527

支持向量回归机模型训练完成后,采用相应模型对机翼盒段试验件上不同位置的载荷信息进行了识别。四种情况下主体1和主体2中部分点的识别结果距离误差及两主体融合后识别结果距离误差如表3所示。从表中可以看出,主体1和主体2在发生故障后识别结果距离误差明显增大,主体1发生故障后识别距离误差相对正常情况平均增加了61.4%,主体2发生故障后识别距离误差相对正常情况平均增加了63.9%。采用多主体协作后,四种情况下,协作后识别结果距离误差相对于主体1正常时识别距离误差分别减小18.9%、减小5.3%、增加2.2%、增加46%,相对于主体2正常时识别距离误差分别减小25.7%、减小13.2%、减小6.6%、增加34%。因此,在传感器故障情况下,采用多主体技术可以对故障传感器信号进行一定的补偿和修复。

表3 试验中各种情况下两个主体独立预测及协作预测结果误差
Table 3 Predicting distance error of the two agents independent and cooperation

		Predicting serials	1	2	3	4	5	6	7	8	Mean value
Predicting error /mm	Single agent result	Agent1 normal	26.4	11.3	14.5	3.0	6.8	19.9	9.5	14.4	13.2
		Agent1 failure	29.3	15.4	10.1	1.3	58.9	24.4	10.8	20.6	21.3
		Agent2 normal	12.1	11.2	17.3	14.6	17.6	12.3	15.2	14.9	14.4
		Agent2 failure	37.9	20.2	16.3	26.9	23.9	6.5	23.0	34.1	23.6
	Agents cooperative result	Agent1, Agent2 normal	5.5	9.5	15.9	8.4	7.5	14.6	9.8	14.7	10.7
		Agent1 failure, Agent2 normal	6.3	10.7	15.6	9.2	18.6	13.8	10.9	14.9	12.5
		Agent1 normal, Agent2 failure	27.8	7.7	14.9	9.4	2.2	16.2	12.3	17.1	13.5
		Agent1, Agent2 failure	31.9	7.6	13.2	15.4	30.8	14.1	17.1	24.4	19.3

5 结 论

针对结构健康监测系统中局部失效的光纤 Bragg 光栅传感器信号,依据同类光纤 Bragg 光栅传感器信号之间的冗余性和相似性,以飞机机翼盒段试验件为研究对象,搭建了多主体协作技术的光纤 Bragg 光栅传感器网络自修复系统试验平台,评估整个系统在部分传感器失效时的自修复能力。研究表明,采用多主体协作技术不仅能对结构健康监测系统中的故障传感器信号进行一定补偿和修复,降低故障传感器对整个系统的影响程度,而且在某些情况下还能提高整个系统的识别精度。

参 考 文 献

- 1 Alan Baker, Nik Rajic, Claire Davis. Towards a practical structural health monitoring technology for patched cracks in aircraft structure[J]. *Compos Part A: Appl Sci Manufac*, 2009, 40(9): 1340-1352.
- 2 Tian Shizhu, Wen Ke, Wang Dapeng. Study on damage location of steel beam based on long-gage fiber grating sensor [J]*Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(4): 040603.
田石柱, 温 科, 王大鹏. 基于长标距光纤光栅传感器的钢梁损伤定位研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(4): 040603.
- 3 Pengchun Peng, Junbo Wang, Kuanyan Huang. Reliable fiber sensor system with star-ring-bus architecture[J]. *Sensors*, 2010, 10(5): 4194-4205.
- 4 Andrew M Gillooly, Lin Zhang, Ian Bennion. High survivability fiber sensor network for smart structures[C]. *SPIE*, 2004, 5579: 99-106.
- 5 Eduardo López Izquierdo, Paul Urquhart, Manuel López-Amo. Protection architectures for WDM optical fibre bus sensor arrays[J]. *J Eng Sci J Int*, 2007, 1(2): 1-18.
- 6 Pu Wei, Xiaohan Sun. A novel FBG sensor network with high survivability[C]. *SPIE*, 2006, 6387: 63870B.
- 7 Hongxia zhang, Shu Wang, Guoqiang Wen, *et al.*. Large-scale self-healing architectures for fiber Bragg grating sensor network[C]. *The 9th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON2010)*, 2010.
- 8 Shenfeng Yuan, Xiaosong Lai, Xia Zhao, *et al.*. Distributed structural health monitoring system based on smart wireless sensor and multi-agent technology[J]. *Smart Mater Struct*, 2006, 15(1): 1-8.
- 9 J Zhou, Z Zhou, D Zhang. Study on strain transfer characteristics of fiber Bragg grating sensors[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2010, 21(11): 1117-1122.
- 10 Mikhail Prokopenko, Peter Wang, Mark Foreman, *et al.*. On connectivity of reconfigurable impact networks in ageless aerospace vehicles[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2005, 53(1): 36-58.
- 11 Xia Zhao, Shenfeng Yuan, Zhenhua Yu, *et al.*. Designing strategy for multi-agent system based large structural health monitoring[J]. *Smart Mater Struct*, 2008, 34(2): 1154-1168.
- 12 Wang Chunlong, Liu Jianguo, Zhao Nanjing, *et al.*. Quantitative analysis of laser-induced breakdown spectroscopy of heavy metals in water based on support-vector machine regression[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0330002.
王春龙, 刘建国, 赵南京, 等. 基于支持向量机回归的水体重金属激光诱导击穿光谱定量分析研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0330002.
- 13 Li Gang, Zhao Xiang. The least square support vector machine (LS-SVM) based on genetic algorithm[J]. *Journal of*

- Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2009, 22(1): 131-141.
- 李 刚, 赵 香. 基于遗传算法的最小平支持向量机[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2009, 22(1): 131-141.
- 14 Lu Jiyun, Liang Dakai, Zhang Xiaoli, *et al.*. Research on structural health monitoring for wing box based on support vector regression machine[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(3): 486-490.
- 芦吉云, 梁大开, 张晓丽, 等. 基于支持向量回归机的机翼盒段结构健康监测研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(3): 486-490.
- 15 Wu Jie, Han Yueping. Information fusion technology of X-Ray grating imaging based on the wavelet transform[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(11): 111003.
- 武 杰, 韩跃平. 基于小波变换的X射线光栅成像多信息融合技术[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(11): 111003.