光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.024

面向自动化装配过程的光纤传感调校系统

孟祥秋[1*]，于金召[2]，王　杰[1]

（1. 吉林建筑科技学院，长春 130000；2. 吉林东光精密机械厂，长春 130000）

摘　要： 为了减小装配误差，解决自动装配过程中强迫装配、装配不到位等问题，设计了基于光纤传感的调校系统。该系统由光纤传感阵列、解调模块、调校控制机构组成。提出了应变分布解算模型，推导了波长与位置偏差的函数关系，仿真分析了工件应变敏感区域的分布特征，量化了应变与位置误差的映射关系。实验采用可调施力结构对系统应变监测量进行标定，采用视觉测量对系统位置偏差量进行标定。实验结果显示，位置偏差与波长变化呈线性映射关系，验证了依据波长反演装配位置偏差的可行性。与视觉测量的标准值相比，该系统的位置偏差平均相对误差为8.6%。由此可见，该系统具有实时、精确反演工件应变场的计算能力，在自动化装配中具有很好的应用前景。

关键词： 光纤传感；装配调节；自动化；位置偏差

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0578－04

Optical Fiber Sensor Adjustment System for Automated Assembly Process

MENG Xiangqiu[1]，YU Jinzhao[2]，WANG Jie[1]

（1. Jilin University of Architecture and Technology，Changchun 130000，CHN；
2. Jilin Dongguang Precision Mechanism Factory，Changchun 130000，CHN）

Abstract： In order to reduce assembly errors and solve problems such as forced assembly and incomplete assembly during the automatic assembly process，the optical fiber sensing calibration system was designed. The system consists of a fiber-optic sensor array，a demodulation module，and a tuning control mechanism. A solution model for strain distribution was proposed，and the function relationship between wavelength and position deviation was deduced. The distribution characteristics of the strain sensitive area of the workpiece were analyzed by simulation，and the mapping relationship between strain and position error was quantified. In the experiment，adjustable force structure was used to calibrate the system strain monitoring data，and visual measurement was used to calibrate the system position deviation. The experimental results show that the position deviation has a linear mapping relationship with the wavelength change. It is feasible to invert the deviation of the assembly position by the wavelength. Compared with the standard value of visual measurement，the average relative error of the position deviation of the system is 8.6%. The strain field of the workpiece can be inverted by this system in real time.

Key words： fiber optic sensing；assembly adjustment；automation；position deviation

收稿日期：2020－04－18.

基金项目：国家自然科学基金项目(61703056)；吉林省高等教育学会项目(JGJX2019D500).

* **通信作者：**孟祥秋

E-mail： mengxiangqiunuc@sina.com

0　引言

随着《中国制造 2025》的提出，制造业的工业化和现代化成为近几年重要的发展方向[1]，其中，自动化装配技术是制造业迈向自动化、数字化、智能化的关键环节。自动化装配技术需要装配工件具有很好的参数采集与数据实时处理能力，才能保证装配速度快、稳定性好，实现生产线的高效工作[2]。装配过程中的装配错位、强迫装配、装配不足等问题[3]都可以通过对装配工件应变场分布的分析获得，故研究精确、快速获取装配工件应变场参数的传感网络对自动化装配过程的精确反馈控制具有重要意义。

在传统的模具类产品生产流水线上，只需要利用程序完成机械臂的路径规划就能够对固定工位上的工件进行安装，从而形成自动化装配[4]。但这样的工艺适用范围越来越局限，一是随着产品结构的复杂度增加，每个工件尺寸误差的累计会导致装配出错率大幅上升；二是对于大尺寸工件、复杂面形工件而言，固定路径不足以完成装配，必须借助装配调校系统。

应用于装配调校系统的技术有：光学测量法[5-6]、图像处理法[7-8]、传感器反馈法[9-10]。光学测量法利用激光测距等原理实现标准点之间的精密测量，从而根据基准点之间的空间位置调整装配角度及距离。该方法精度高、速度快，但需要待装工件为合作目标，且具有基准点，否则通过扫描完成工件外形及位置的操作会出现数据量巨大、工作效率低等问题，不适合大规模工业生产[11]。图像处理法与光学测量法类似，通过采集装配位置图像提供调校数据，无需基准点，具有更好的通用性，但受工装位置开敞性影响较大，并且辅助装配精度低[12]。传感器反馈法是利用电学、光学等传感器采集装配工装、工件的应变场提供数据反馈来实现指导装配的[13]。相比电学器件，光纤传感具有无源、抗干扰能力强、可大范围多点监测、体积可忽略等诸多优势，故本文研究了一种面向自动化装配的光纤传感调校系统。

1　系统设计

1.1　系统组成

光纤传感调校系统由可调谐激光器、光纤耦合器、解调仪、光纤光栅等组成，系统结构如图 1 所示。调制光源对入射光纤的光进行扫频，入射光经光纤耦合器进入光纤传感网络中，然后到达应变感知模块，即光纤光栅（Fiber Bragg Grating[14-15]，FBG）位置，将对应位置上的应变信息加载到波长变化信息中。将 FBG 固定在装配机械手、大型工件对接处、应变敏感区等位置，获取待测工件应变场的实时数据，从而实现装配的在线调校。

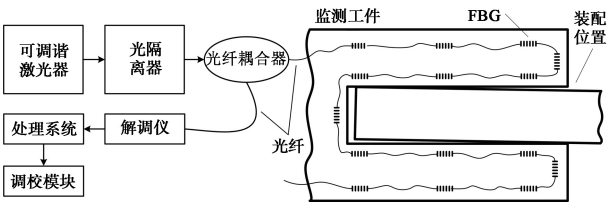


图 1　光纤传感调校系统示意图

如图 1 所示，光纤传感网络中的 FBG 分布在待测工件的应变敏感区域，从而获取装配区域的实时应变场分布数据，为调校模块提供数据支撑。

1.2　传感机理

在装配过程中，工件受夹持、挤压等会产生形变，从而导致 FBG 产生相应的变形，使回波的中心波长 λ_B 发生偏移。利用波长与应变的线性关系能够求得被测工件上各个装配位置的应力分布。设工件监测环境温度不变，则中心波长 λ_B 只与有效折射率 n_{eff} 和光栅周期 Λ 有关，且满足如下关系：

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

针对工件的应变监测可知，中心波长改变量与应变的函数关系为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_\varepsilon)\varepsilon \tag{2}$$

其中，ε 为应变量，P_ε 为弹光系数。

1.3　应变分布解算模型

将波长变化量 $\Delta\lambda_B$ 与工件偏差位置 η 之间的函数关系写成 $W_iC = Y$ 形式的超定方程，W 表示波长，i 表示其对应的 FBG，从而构成测试波长值集合，即 $\Delta\lambda_1 \sim \Delta\lambda_i$；$C$ 为参考系数，用于反映波长与工件位置偏差的比例程度，其是一个系数集合，每个位置对应一个参考系数；Y 为变形后真实位置的位置偏差集合，其 x 轴分量表示为 $\mathrm{d}x$，y 轴分量表示为 $\mathrm{d}y$，z 轴分量表示为 $\mathrm{d}z$。由此可得：

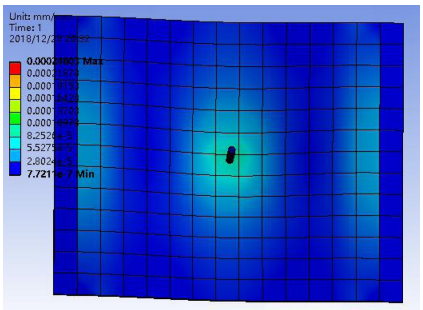
$$(\mathrm{d}x, \mathrm{d}y, \mathrm{d}z) = [\Delta\lambda_{B1} \cdots \Delta\lambda_{Bi}] \cdot [C_{x_1,y_1,z_1} \cdots C_{x_i,y_i,z_i}]^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

其中，$\Delta\lambda_i$ 可以通过 FBG 测试获得，C_i 可以通过对标准作用力测试标定得到，而 $(\mathrm{d}x, \mathrm{d}y, \mathrm{d}z)$ 即为调校系统提供的装配调校参考信息。因为整个采集过程是实时反馈的，当光纤传感网络采集的应变分布数据超过阈值时，就会为自动装配模块提供修正参数。

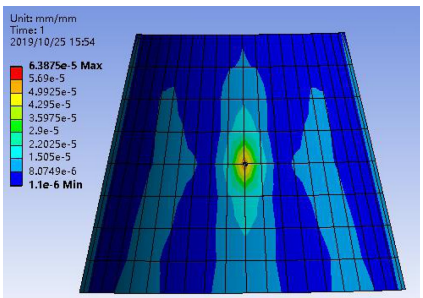
当装配机械臂完成修正后，应力得到有效释放，进而使得光纤传感网络测试数据低于阈值，完成正常装配，从而实现在线装配的自动调校。

2 仿真分析

为了获得工件在装配过程中属于敏感区域的位置信息，并且量化应变灵敏度与装配调校系统的匹配关系，需要对不同应力条件下工件的应变场分布进行仿真。为了使系统具有更好的通用性，分别在平面和曲面上取任意两个施力位置分析应变分布特性，从而将其拓展至任意工件外形的敏感监测位置，仿真结果如图 2 所示。



(a) 平面受力分布



(b) 曲面受力分布

图 2 不同形状工件受力后的应变场分布仿真结果

由图 2(a)可知，对于平面工件而言，施力点在工件中心位置时，应变场的分布与施力点的绝对距离大致呈散射状分布，与固定点方向的应变梯度差异较大，在自由端的应变梯度变化相对较小，从而形成类似椭圆的等势线。由图 2(b)可知，对于曲面工件而言，施力点仍在工件中心位置，但其应力分布与平面工件的应力分布存在巨大差异，不仅固定点方向的应变梯度明显增大，而且在自由端方向的应变场分布也不再均匀。同时，其分布特性受曲面曲率的影响明显，随着曲率的增大，应变梯度变化斜率增大，距施力点的应变效应被削弱。由两种常用形状结构的应力场分布仿真结果可知，无论平面或曲面，曲率大小、应变场分布均存在等势区域，故只要按照装配工艺就能找到应力点的集中位置，而在这些敏感位置放置 FBG 就能有效地获取装配过程中的应力场分布，并为调校系统提供参数依据。

3 实验

3.1 实验系统搭建

系统采用 TSP-1000 型可调谐激光器和 JH-FBG-D1 型光纤光栅解调仪，FBG 采用应力预紧型封装。为了简化结构，利用可调节施力臂对工件进行挤压施力来模拟装配位置的应力场变化，待测工件为 3 mm 厚铝合金板。由于施力臂可调节，故应力点的施力值可知，而光纤传感系统又可以通过式(2)获得 FBG 位置处的应力变化，从而完成应力点与波长变化量的对应系数标定，即完成可控应变量调节标定实验，实验系统结构如图 3 所示。

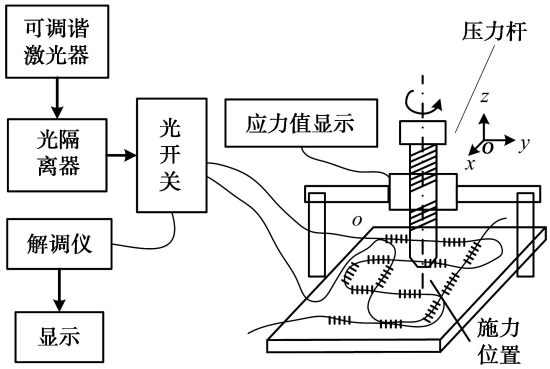


图 3 可控应变量调节标定实验系统示意图

系统利用光开关分时控制两根测量光纤，每根光纤上携带多个 FBG 传感器，应力点的施力值可调，并且调节量可通过应力显示器显示。由此只要将对应位置上 FBG 的回波波长与施力量建立函数关系就能够对工件应力场进行实时监测。在保证不发生塑性形变的条件下，改变压力值，记录 FBG 的回波变化量，系统每 5 s 采集一次各点的波长偏移量，重复 3 组测试数据取平均。系统内采用单独的 FBG 进行温度补偿，用于消除环境温度变化造成的测试误差。

3.2 测试点函数对应关系

通过实验可以获取每个 FBG 测试点应力值与波长变化量之间的函数关系，由此关系给出被测工件的位置偏差量，从而为自动装配系统提供补偿参数。不同位置对同一应力的响应值在测试实验中可以得到标定，因为每个 FBG 的响应值在弹性变形过

程中是线性的。对于每个测试点的波长、位置变化量的测试结果如图 4 所示。

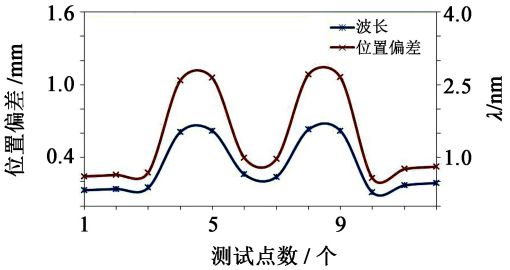


图 4　位置偏差与波长变化的对应关系

由测试点关系可知，位置偏差与波长变化趋势完全吻合，可以通过线性比例关系完成波长与位置的映射关系，从而与校正位置建立联系。

3.3　测试数据对比

为了量化应变场变化量与工件形变程度的关系，采用相比应变检测方法精度高 1～2 个数量级的光学扫描法进行对比验证。激光扫描仪定位精度为 50 μm，扫描速度为 10 000 点/秒，获取的点云数据在 VXelements 中处理获得(dx，dy，dz)的准确值，再用 FBG 测试反演数据进行对比，结果如表 1 所示。

表 1　数据测试值对比

坐标/cm	仿真值/mm	视觉测量值/mm	FBG 反演值/mm	坐标/cm	仿真值/mm	视觉测量值/mm	FBG 反演值/mm
(2,6)	0.133	0.147	0.13	(8,12)	0.261	0.252	0.24
(2,9)	0.121	0.158	0.14	(10,6)	0.554	0.618	0.63
(4,12)	0.153	0.164	0.15	(10,9)	0.587	0.591	0.62
(6,6)	0.532	0.638	0.61	(12,12)	0.167	0.137	0.11
(6,9)	0.595	0.687	0.62	(14,6)	0.144	0.189	0.17
(8,3)	0.247	0.286	0.26	(14,9)	0.158	0.174	0.19

在测试数据表中，坐标位置与如图 3 中(x，y，z)关系一致，原点位置在模拟监测工件的左上方 o 的位置，则各个坐标点表示 FBG 黏贴在待测工件上的位置。总体上看，三种数据的变化趋势是相同的，但测试效果存在明显差异。仿真值表示采用 ANSYS 模拟在相应应力条件下的形变量，在仿真分析中，计算得到的位置误差变化相对平缓，而采用视觉测量的变化梯度明显大于仿真值，说明实际工件在受力条件下的变化趋势更为明显。虽然仿真计算精度较高，但由于受工件材料实际的均匀性、应力作用点位置等影响，与视觉实测值还是存在较大误差。相比之下，FBG 反演计算得到的估读值与标准值更为接近，与标准值相比，平均相对误差优于 8.6%。在实际应用过程中，只要对已铺设在装配结构中的 FBG 传感系统进行光学方法标定，就能在自动装配中实时地完成装配位置的在线校正。由此可见，该系统对于自动装配过程具有很好的辅助作用。

4　结论

本文针对自动装配过程中强迫装配、装配不到位等问题，研究了一种基于光纤传感的调校系统。该系统可以实时获取工件敏感位置的应力分布，为装配微调系统提供工件位置偏差参考数据，从而达到实时修正装配轨迹、减小装配误差的目的。实验验证了位置偏差与波长变化的函数关系，并通过视觉测量的位置偏差标定了光纤传感系统的位置反演结果，验证了系统的可行性。综上所述，该系统适用于自动化装配过程，具有很好的应用价值。

参考文献：

[1] Skvortsov M I, Wolf A A, Dostovalov A V, et al. Distributed feedback fiber laser based on a fiber Bragg grating inscribed using the femtosecond point-by-point technique[J]. Laser Phys. Lett., 2018, 15(3): 35-103.

[2] Al-Anany Y M, Tait M J. Fiber-reinforced elastomeric isolators for the seismic isolation of bridges[J]. Composite Structures, 2016, 160(7): 300-311.

[3] Kuang Y, Guo Y, Xiong L, et al. Packaging and temperature compensation of fiber Bragg grating for strain sensing: A survey[J]. Photonic Sensors, 2018, 8(4): 320-331.

[4] Mulle M, Yudhanto A, Lubineau G, et al. Internal strain assessment using FBGs in a thermoplastic composite subjected to quasi-static indentation and low-velocity impact [J]. Composite Structures, 2019, 215(32): 305-316.

[5] Arnaldo G. Leal-Junior, Camilo A R, et al. Simultaneous measurement of pressure and temperature with a single FBG embedded in a polymer diaphragm[J]. Optics & Laser Technol., 2019, 112(93): 77-84.

[6] Yu C W, Lei S C, Chen W S, et al. Downhole fiber optic temperature-pressure innovative measuring system used in sanshing geothermal test site[J]. Geothermics, 2018, 74(31): 190-196.

[7] Guo Y X, Li X, Kong J Y, et al. Sliding type fiber Bragg grating displacement sensor [J]. Optics & Precision Engineering, 2017, 25(1): 50-58.

[8] 曲道明，孙广开，李　红，等. 变形机翼柔性蒙皮形状光纤传感及重构方法[J]. 仪器仪表学报，2018，39(2)：460-40.
Qu D M, Sun G K, Li H, et al. Optical fiber sensing and reconstruction method for morphing wing flexible skin shape [J]. Chinese J. of Scientific Instrument, 2018, 39(2): 460-40.

(下转第 586 页)

recognition method based on deep convolution generating adversarial network [J]. J. of Southwest University for Nationalities (Nature Science Edi.), 2019, 45(2): 185-191.

[6] 张雪芹，陈嘉豪，诸葛晶晶，等. 基于深度学习的快速植物图像识别[J]. 华东理工大学学报(自然科学版)，2018，44(6)：887-895.
Zhang X Q, Chen J H, Zhuge J J, et al. Fast plant image recognition based on deep learning [J]. J. of East China University of Science and Technology (Nature Science Edi.), 2018, 44(6): 887-895.

[7] 于慧伶，麻峻玮，张怡卓. 基于双路卷积神经网络的植物叶片识别模型[J]. 北京林业大学学报，2018，40(12)：132-137.
Yu H L, Ma J W, Zhang Y Z. Plant leaf recognition model based on two-way convolutional neural network [J]. J. of Beijing Forestry University, 2018, 40(12): 132-137.

[8] 郑一力，张 露. 基于迁移学习的卷积神经网络植物叶片图像识别方法[J]. 农业机械学报，2018，49(S1)：354-359.
Zheng Y L, Zhang L. Method for plant leaf image recognition based on transfer learning convolutional neural network[J]. J. of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2018, 49(S1): 354-359.

[9] 陈肖蒙，王 瑜，邢素霞. 基于小波和可变局部边缘模式的植物物种识别[J]. 计算机应用与软件，2018，35(9)：230-235.
Chen X M, Wang Y, Xing S X. Plant species recognition based on wavelet and variable local edge pattern [J]. Computer Applications and Software, 2018, 35(9): 230-235.

[10] 关 胤. 基于残差网络迁移学习的花卉识别系统[J]. 计算机工程与应用，2019，55(1)：174-179.
Guan Y. Flower recognition system based on residual network transfer learning[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(1): 174-179.

[11] 毕立恒. 基于叶片图像算法的植物种类识别方法研究[J]. 浙江农业学报，2017，29(12)：2142-2148.
Bi L H. Research on plant species recognition method based on leaf image algorithm[J]. Zhejiang J. of Agriculture, 2017, 29(12): 2142-2148.

[12] 陈淑君，周永霞，方勇军. 基于整体外观特征的植物种类识别研究[J]. 计算机应用与软件，2017，34(9)：222-227.
Chen S J, Zhou Y X, Fang Y J. Research on plant species recognition based on overall appearance features[J]. Computer Applications and Software, 2017, 34(9): 222-227.

[13] Srdjan S, Marko A, Andras A, et al. Deep neural networks based recognition of plant diseases by leaf image classification [J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2016, 2016: 2453.

[14] Tang Qiling, Sang Nong, Liu Haihua. Contrast-dependent surround suppression models for contour detection [J]. Pattern Recognition, 2016, 60: 51-61.

[15] Lin Chuan, Xu Guili, Cao Yijun, et al. Improved contour detection model with spatial summation properties based on nonclassical receptive field [J]. J. of Electronic Imaging, 2016, 25(4): 43018.

[16] Suh H K, Hofstee J W, IJsselmuiden J, et al. Sugar beet and volunteer potato classification using Bag-of-Visual-Words model, scale-invariant feature transform, or speeded up robust feature descriptors and crop row information [J]. Biosystems Engin., 2017, 166: 210-226.

[17] Mukherjee P, Lall B. Saliency and KAZE features assisted object segmentation[J]. Image and Vision Computing, 2017, 61(c): 82-97.

作者简介：

王彦秋(1979－)，女，辽宁丹东人，硕士，实验师，研究方向为教育信息化、人工智能；

冯英伟(1980－)，男，辽宁海城市人，硕士，副教授，研究方向为云计算、物联网技术。

(上接第 581 页)

[9] 吴 俊，陈伟民，舒岳阶，等. 锚头植入式应变均化光纤布喇格光栅测力传感器[J]. 光子学报，2015，44(7)：95-100.
Wu J, Chen W M, Shu Y J, et al. Analysis on strain transfer of a pasted FBG strain sensor[J]. Optik, 2015, 44(7): 95-100.

[10] Sun L, Hao H, Zhang B B, et al. Strain transfer analysis of embedded fiber Bragg grating strain sensor[J]. J. of Testing and Evaluation, 2016, 44(6): 2312-2320.

[11] Sun Baochen, Li Jianzhi, Zhang Wentao. Fiber Bragg grating sensor[J]. Optical Fiber Sensing and Structural Health Monitoring Technology, 2019, 26(4): 77-148.

[12] Botsisj, Humbertl, Colpof, et al. Embedded fiber Bragg grating sensor for internal strain measurement sin polymeric materials[J]. Optics and Laser Sin Engineering, 2005, 43(3): 491-510.

[13] Giovanna P, Daniele T, Agostino I, et al. Analysis and design of chirped fiber Bragg grating for temperature sensing for possible biomedical applications[J]. IEEE Photon. J., 2018, 10(3): 1-15.

[14] Yucel M, Torun M. Simplified fiber Bragg grating-based temperature measurement system design with enhanced high signal-to-noise ratio [J]. Microwave & Optical Technol. Lett., 2018, 60(4): 965-969.

[15] Mesquita E, Pereira L, Theodosiou A, et al. Optical sensors for bond-slip characterization and monitoring of RC structures [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 280(1): 332-339.

作者简介：

孟祥秋(1986－)，女，硕士，实验师，主要从事光电测试方面的研究。