

# 基于逆传播神经网络的光纤布拉格光栅触觉传感

钱牧云, 余有龙

合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009

**摘要** 为实现机械手指的复合式触觉传感,以光纤布拉格光栅(FBG)为传感元件,将压力传感器和温度传感器封装在同一聚合物传感单元中。分析了压力传感器受目标物体温度扰动的特性,同时利用逆传播神经网络对 FBG 触觉传感信号进行处理,实现了对传感单元表面正向压力的准确识别。仿真与实验结果表明,该方法进一步消除了目标物体温度对应变传感器的影响,减小了应变传感器的不确定性误差,提高了压力测量结果的稳定性和测量精度,补偿后压力传感器的温度漂移率仅为  $1.2 \times 10^{-4}$  nm/°C。将补偿研究应用于机械手指 FBG 触觉传感阵列,可以有效抑制温度对应变传感的干扰,使得柔性机械手指触滑测量系统具有更加广阔的应用前景。

**关键词** 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 逆传播神经网络; 触觉传感; 压力; 温度补偿

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0806001

## Tactile Sensing of Fiber Bragg Grating Based on Back Propagation Neural Network

Qian Muyun, Yu Youlong

School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology,  
Hefei, Anhui 230009, China

**Abstract** In order to realize the compound tactile sensing of mechanical finger, a pressure sensor and a temperature sensor are packaged in the same polymer sensing unit, and a fiber Bragg grating (FBG) is used as a sensing element. The characteristics of the pressure sensor disturbed by temperature of target object are analyzed. A back propagation neural network is used to process the tactile sensing signal of FBG, and thus the recognition of the positive pressure applied on the surface of sensing unit is achieved accurately. The simulation and experimental results show that this method eliminates the effect of the target object's temperature on the strain sensor, and the uncertainty error of strain sensor is reduced. The compensation improves the stability of the pressure measurement and the measurement accuracy. The temperature drift rate of pressure sensor is  $1.2 \times 10^{-4}$  nm/°C after compensation. The research can be applied to the FBG tactile sensing array installed on the mechanical finger. The temperature interference to the strain sensing can be suppressed, so that the tactile and sliding measurement system of flexible mechanical fingers have a broad application prospect.

**Key words** fiber optics; fiber Bragg grating; back propagation neural network; tactile sensing; pressure; temperature compensation

**OCIS codes** 060.3735; 060.2370; 150.1130

## 1 引言

触觉主要用于感知目标物体的物理特性,包含接触觉、滑动觉和热感觉等<sup>[1]</sup>。接触觉和滑动觉的检测可使机器人敏感且准确地感知外界环境,并在复杂多元的环境下完成预定的抓取功能;热感觉的检测有助于了解接触物的温度和导热性能。目前已有的触觉传感器从工作原理上大致可分为压电式<sup>[2]</sup>、压阻式<sup>[3]</sup>、电容

收稿日期: 2017-03-16; 收到修改稿日期: 2017-03-30

作者简介: 钱牧云(1985—),女,博士研究生,主要从事光纤光栅传感技术方面的研究。E-mail: nemo\_my@163.com

导师简介: 余有龙(1965—),男,博士,教授,主要从事光纤光栅传感及网络化技术、光纤激光器以及光无源器件等方面的研究。E-mail: youlongyu@163.com(通信联系人)

式<sup>[4]</sup>、光波导式<sup>[5]</sup>以及磁敏式<sup>[6]</sup>等。Shimojo 等<sup>[7]</sup>研制了一种压力灵敏度为 0~0.2 MPa 且可以附着于弯曲表面的压阻式触觉传感器;郭小辉等<sup>[8]</sup>将电容式力敏传感器与薄膜温敏传感器进行集成,构成一体化的温度/压力复合式传感器;Kim 等<sup>[3]</sup>提出了一种基于微弯光纤的分布式触觉传感系统,利用该系统模拟接触力的大小等信息。这些触觉传感器虽然有较高的传感精度和空间分辨率,但大多存在输入/输出接口复杂、传感结果易受到电磁场和潮湿环境影响等问题,因此集触、滑、热等多种感觉于一身的复合式触觉传感技术将更具应用前景<sup>[9]</sup>。

光纤布拉格光栅(FBG)是一种带阻滤波型光无源器件,其传感结果不受环境电磁场以及光路中光强波动的干扰,广泛应用于对多种物理量的传感<sup>[10-11]</sup>。使用 FBG 作为传感元件对机械手指进行触觉感知,可有效弥补上述传统触觉传感系统存在的缺点。逆传播(BP)神经网络是一种多层前馈神经网络,利用输入和输出样本集对网络的阈值和权值进行学习和修正,使网络实现给定输入输出的映射关系<sup>[12]</sup>。邵军等<sup>[13]</sup>应用 BP 神经网络抑制温度对 FBG 压力传感器的干扰,提高了压力传感器的选择性。基于 Dempster-Shafer 论据<sup>[14]</sup>和贝叶斯算法<sup>[15]</sup>等进行建模具有一定局限性,且不易满足实际环境,使用 BP 神经网络对触觉信号进行信息融合可以解决这些问题,使传感系统具有更强的容错性和稳健性。

在分析 FBG 应变传感器受温度扰动特性的基础上,引入 FBG 温度传感器,对应变传感的结果进行补偿,并将 BP 神经网络应用于传感数据的处理中,提高了压力传感的准确度和精度。

## 2 理论分析

在同一温度场中同时放置两个 FBG 传感器,一个作为应变传感器,该传感器对应变和温度较敏感;另一个作为温度传感器,该传感器只对温度敏感。

对于应变传感器,有

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} = (1 - P_e)\epsilon + (\alpha_1 + \xi)\Delta T, \quad (1)$$

式中  $\lambda_{B1}$  和  $\Delta\lambda_{B1}$  分别为 FBG 应变传感器的布拉格中心波长和布拉格中心波长漂移量,  $P_e$  为有效弹光系数(对于硅纤介质,  $P_e=0.22$ ),  $\alpha_1$  为应变传感器的膨胀系数,  $\xi$  为热光系数(对于硅纤介质,  $\xi=6.67\times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$ ),  $\epsilon$  为应变,  $\Delta T$  为温度变化量。

对于温度传感器,有

$$\frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = (\alpha_2 + \xi)\Delta T, \quad (2)$$

式中  $\alpha_2$  为温度传感器的膨胀系数。

由(1)、(2)式推导得到

$$\epsilon = \frac{\Delta\lambda_{B1}/\lambda_{B1} - \mu\Delta\lambda_{B2}/\lambda_{B2}}{1 - P_e}, \quad (3)$$

式中  $\mu=(\alpha_1 + \xi)/(\alpha_2 + \xi)$ 。由于两根 FBG 处于同一温度场,两者发生相同的温度效应,因此,对于应变传感器,通过消除温度变化引起的波长漂移即可得到应变单独引起的波长漂移。

## 3 传感器结构与仿真分析

### 3.1 传感器结构设计

封装在同一聚合物材料中的 FBG 传感单元光栅分布示意图如图 1 所示,温度传感器 FBG<sub>3</sub> 用于对应变传感器 FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 进行温度补偿。埋置前对应变传感光栅处包层表面用硅烷偶联剂进行预处理,以增加传感器的压力灵敏度。

### 3.2 仿真与结果分析

封装体为硅橡胶,在其表面施加的正压力  $F=5.2 \text{ N}$ ,使正压力均匀作用于接近中心处  $10 \text{ mm}\times 10 \text{ mm}$  的面积上。为获得埋置于硅橡胶中 FBG 应变传感器的  $x$  轴位移,需要利用 ANSYS 11.0 进行仿真。封装体的尺寸设置为  $30 \text{ mm}\times 30 \text{ mm}\times 5 \text{ mm}$ ,求解后取  $y=15 \text{ mm}$  的切面得到其  $x$  轴位移等值线,如图 2 所示。

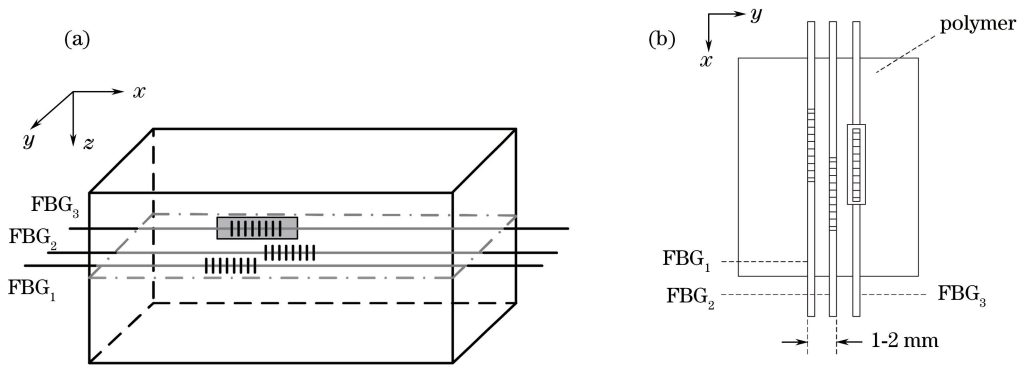


图 1 FBG 传感单元光栅分布示意图。(a)三维分布图;(b)截面图

Fig. 1 Distribution diagram of FBG sensing elements. (a) Three-dimensional distribution; (b) sectional view

观察封装体厚度  $z$  分别为 1, 2, 3, 4 mm 处的  $x$  轴位移可知, 将长度为 10 mm 的 FBG 应变传感器埋置于  $z_1 = 1$  mm 和  $z_3 = 3$  mm 处时, 应变传感器在  $x$  轴产生较大位移, 对应最大位移绝对值分别为  $1.56 \times 10^{-9}$  m 和  $1.48 \times 10^{-9}$  m,  $F = 5.2$  N 时封装材料的  $x$  轴位移图如图 3 所示。

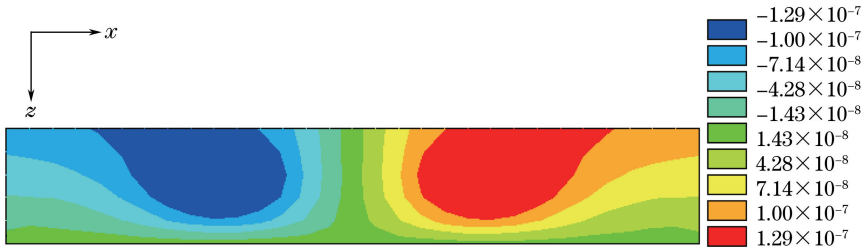


图 2 ANSYS 仿真  $x$  轴位移等值线

Fig. 2 Displacement contours of  $x$ -axis simulated by ANSYS

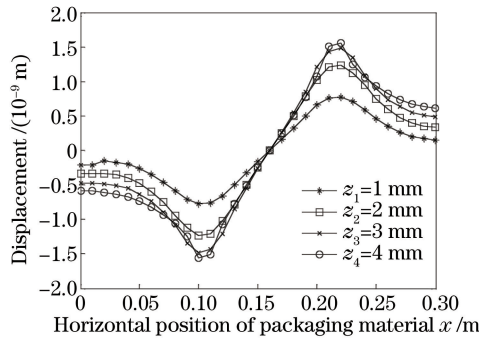


图 3  $F = 5.2$  N 时封装材料的  $x$  轴位移图

Fig. 3 Displacement diagram of  $x$ -axis of packaging material when  $F = 5.2$  N

将 FBG 应变传感器水平埋置于封装体  $z_3 = 3$  mm 处。为了得到封装体中 FBG 应变传感器的中心波长随接触物温度变化的情况, 假设接触物为铁, 其尺寸为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ , 温度为  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ , 封装体温度为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。仿真得到铁与封装体的接触 500 s 后,  $y = 15 \text{ mm}$  切面的温度场分布等值线, 如图 4 所示。由图 4 可见, 铁与封装体的接触面温度降至约  $32.93 \text{ }^\circ\text{C}$ 。当铁的温度分别为  $30, 40, 50, 60, 70, 80 \text{ }^\circ\text{C}$  时的 FBG 传感曲线如图 5 所示。由图 5 可见, 初始阶段传感器测得的温度变化较为剧烈, 随后测得的温度变化逐渐减缓, 并且趋近于某个特定值。

## 4 实验与结果分析

### 4.1 压力/温度实验

为了探索仿真中传感器最优化的埋置参数, 将 FBG 应变传感器分别水平埋置于大小为

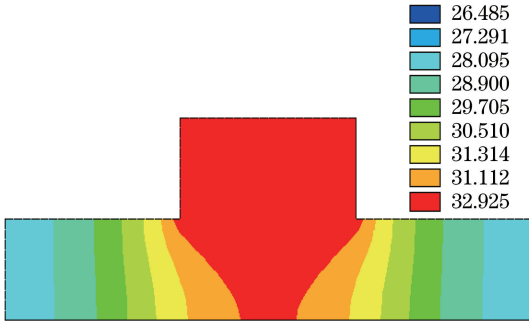


图 4 温度场分布等值线

Fig. 4 Contours of temperature field distribution

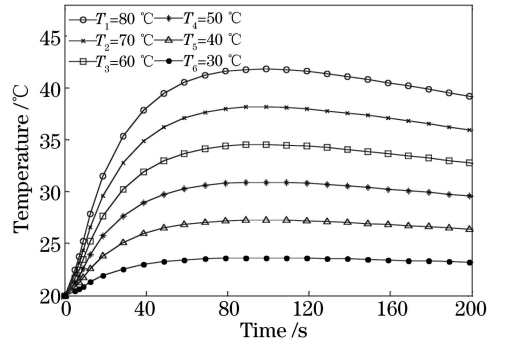


图 5 不同初始温度下的 FBG 温度传感曲线

Fig. 5 Temperature sensing curves of FBG under different initial temperatures

75 mm×15 mm×5 mm的长方体聚合物厚度  $z$  分别为 1, 3, 4 mm 处, 对目标物体分别为圆柱形的铜(Cu)、铝(Al)、木材和塑料 4 种不同的工件进行接触测试, 得到的 FBG 传感器埋置参数优化结果如表 1 所示。表中  $\Delta\lambda_{Bz1}$ 、 $\Delta\lambda_{Bz3}$ 、 $\Delta\lambda_{Bz4}$  分别为 FBG<sub>z1</sub>、FBG<sub>z3</sub>、FBG<sub>z4</sub> 应变传感器的布拉格中心波长漂移量, Y 代表接触状态识别成功, N 代表接触状态识别未成功。

表 1 FBG 传感器埋置参数优化结果

Table 1 Embedded parameter optimization results of FBG sensor

Material	FBG <sub>z1</sub>	FBG <sub>z3</sub>	FBG <sub>z4</sub>	Contact state (FBG <sub>z1</sub> /FBG <sub>z3</sub> /FBG <sub>z4</sub> )
	$\Delta\lambda_{Bz1} / \text{nm}$	$\Delta\lambda_{Bz3} / \text{nm}$	$\Delta\lambda_{Bz4} / \text{nm}$	
Cu	0.059	0.165	0.013	Y/Y/Y
Al	0.024	0.034	0.007	Y/Y/Y
Wood	0.007	0.029	0.002	Y/Y/N
Plastic	0.022	0.007	0.001	Y/Y/N

由表 1 可见, 当 FBG 应变传感器被埋置于封装体  $z_4 = 4$  mm 处时, 传感器无法准确识别质量较小物体(如木材、塑料凳等)的接触状态; 当传感器被埋置于  $z_1 = 1$  mm 和  $z_3 = 3$  mm 时, 对于上述 4 种工件的接触状态, 传感器均能准确识别, 且 FBG<sub>z3</sub> 较 FBG<sub>z1</sub> 有更好的触觉稳定性。结合仿真结果, 选择将传感器埋置于  $z_3 = 3$  mm 处。

在  $0 \sim 3.6919 \times 10^{-4}$  MPa 的压力范围内, 对 FBG 应变传感器进行多次压力传感实验, 对多次测量值取平均, 并将实验所得数据与仿真结果进行对比, 得到 FBG 传感和仿真所得压力响应曲线, 如图 6 所示。在封装体表面相同位置分别施加 0.05, 0.10, 0.20, 0.50 N 的  $z$  轴正向载荷时, FBG 触觉响应曲线如图 7 所示。

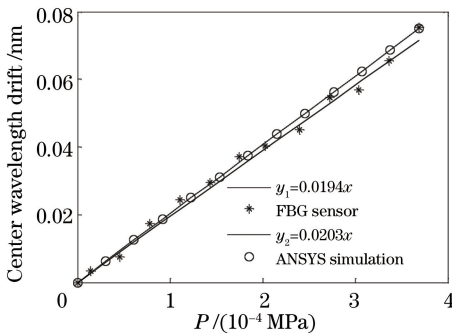


图 6 FBG 传感实验和仿真所得压力响应曲线

Fig. 6 Pressure response curves of FBG obtained by experiment and simulation

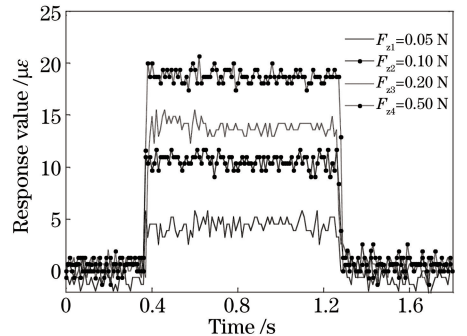


图 7 FBG 触觉响应曲线

Fig. 7 Tactile response curves of FBG

由图 6 可见, 经处理后埋置在封装体中的 FBG 传感器的压力响应曲线具有良好的线性度, FBG 传感器的中心波长漂移量对压力的敏感度系数  $K_p = 0.194$  pm/Pa; 实验值与仿真值变化趋势相同, 与仿真值相比, 最大绝对误差为 0.00189 nm, 验证了实验中的 FBG 传感器对正向压力传感的准确性和可靠性。同时, 由

图 7 可见,在  $t_1=0.36$  s 时施加载荷,FBG 传感器受到应力脉冲的作用后,中心波长产生正向漂移,从而导致 FBG 传感器出现正应变; $t_2=1.29$  s 时结束施加载荷,此时 FBG 传感器中心波长回到原始波长。可见,当封装体表面施加大小为  $0.05\sim 0.50$  N 的正向压力且接触阈值  $M_T=0.003$  nm 时,埋置于其中的 FBG 传感器可以实现对压力的无迟滞传感。

在封装体表面不同位置,以 5 mm 为间隔,共在 10 个位置点施加  $F=0.84$  N 的正向压力,触觉传感单元中的 3 根 FBG 的中心波长漂移量如图 8 所示。由图 8 可见,应变传感器 FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 的中心波长漂移在正向压力位置  $x_{1\min}=55$  mm 和  $x_{2\min}=60$  mm 处有最小值  $\Delta\lambda_{\min1}=-0.053$  nm 和  $\Delta\lambda_{\min2}=-0.025$  nm;在正向压力位置  $x_{1\max}=30$  mm 和  $x_{2\max}=45$  mm 处有最大值  $\Delta\lambda_{\max1}=0.050$  nm 和  $\Delta\lambda_{\max2}=0.053$  nm;温度传感器 FBG<sub>3</sub> 由于不受正向压力的影响,中心波长漂移量约为 0。

对于 FBG 应变传感器,需排除温度对压力监测结果的干扰。在测点处引入一常温下工作波长为 1549.620 nm、带宽为 0.741 nm、反射率为 65% 的管式封装 FBG 温度传感器进行温度补偿。当目标物体与封装材料接触后,目标物体温度发生变化,埋置于封装材料中的 FBG 中心波长相应地产生漂移。在不同压强、不同温度下,FBG<sub>1</sub> 的中心波长漂移量如图 9 所示。

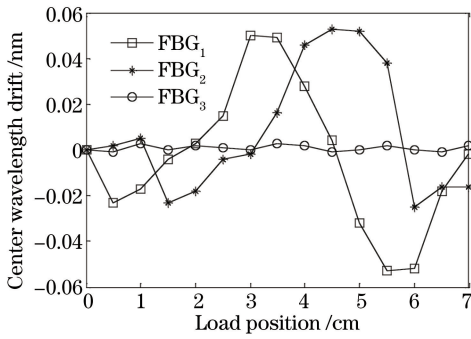


图 8 不同位置载荷的 FBG 中心波长漂移量  
Fig. 8 Center wavelength drift of FBG at different load positions

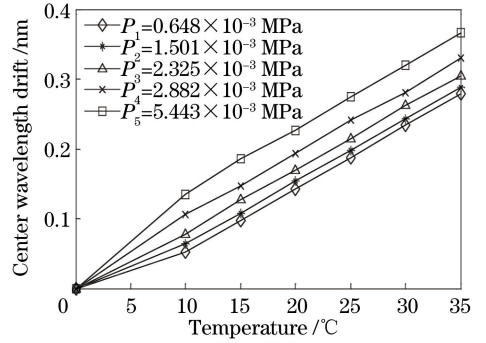


图 9 不同温度与压强下 FBG 中心波长漂移量  
Fig. 9 Center wavelength drift of FBG at different temperatures and pressures

由图 9 可见,温度变化引起 FBG 传感器中心波长发生漂移,引起的中心波长漂移量绝对值随着温度升高而逐渐增大。FBG 中心波长的引用误差为

$$\gamma = \frac{|\Delta\lambda_B|_{\max}}{\lambda_{\text{BFS}}} \times 100\% = \frac{0.3656}{0.101} \times 100\% = 361.98\%, \quad (4)$$

式中  $|\Delta\lambda_B|_{\max}$  为 FBG 中心波长漂移量绝对值的最大值,  $\lambda_{\text{BFS}}$  为压力引起的 FBG 中心波长的变化范围。由 (4) 式可见,FBG 应变传感器受工作温度的影响很大,因此需要对其进行温度补偿和修正,以消除温度这一非目标参量的影响。

#### 4.2 BP 神经网络训练及结果分析

选用 BP 神经网络变梯度算法中的 Polak-Ribiere 修正算法<sup>[16]</sup> 对不同温度、不同压强下 FBG 应变传感器的中心波长漂移量进行 BP 神经网络训练。BP 神经网络采用 3 层结构,输入层有两个神经元,分别为 FBG 传感器中心波长漂移量和温度;输出层有一个神经元,为压强值;隐层神经元个数通过反复实验获得。选用应变传感器 FBG<sub>1</sub> 在不同温度下压强分别为  $0.648 \times 10^{-3}$ ,  $1.501 \times 10^{-3}$ ,  $1.784 \times 10^{-3}$ ,  $2.235 \times 10^{-3}$ ,  $2.882 \times 10^{-3}$ ,  $3.770 \times 10^{-3}$  MPa 的数据作为网络学习样本,将不同温度下压强分别为  $1.237 \times 10^{-3}$ ,  $2.730 \times 10^{-3}$ ,  $5.443 \times 10^{-3}$  MPa 的数据作为网络检验样本。当隐层节点个数小于等于 40 时,BP 神经网络训练步数大于等于 5000 步。隐层节点个数分别为 40,50,60,70,80,90,100 时,隐层节点个数与 BP 神经网络训练性能之间的关系如图 10 所示,由图 10 可见,当隐层节点个数为 70 时,有最小的均方误差 0.2774。选择隐层节点个数为 70,当目标误差为 0.001 时,BP 神经网络训练过程中的误差性能曲线如图 11 所示。由图可见,网络在第 269 步时达到目标误差。

与 FBG<sub>1</sub> 相同,选择 FBG<sub>2</sub> 在不同温度下不同压强的网络学习样本数据。经 Matlab 进行 BP 神经网络

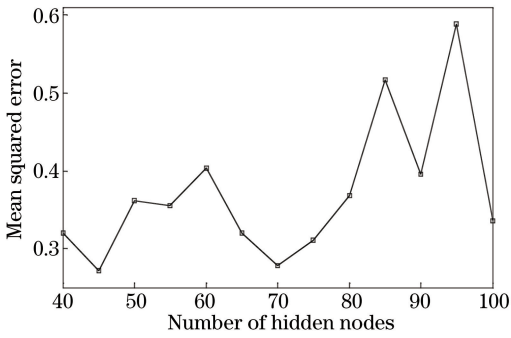


图 10 隐层节点个数与 BP 神经网络训练性能之间的关系

Fig. 10 Relationship between number of hidden nodes and performance of BP neural network training

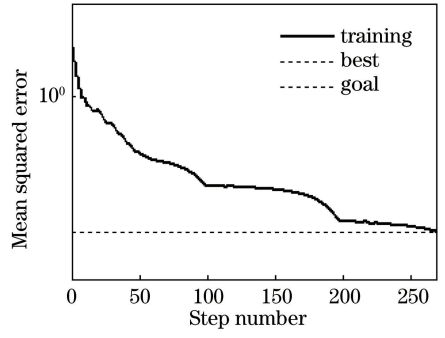


图 11 BP 神经网络训练过程的误差性能曲线

Fig. 11 Error performance curves of BP neural network training process

训练后,将检验样本的训练值与真实值进行比较,得到  $FBG_1$  和  $FBG_2$  的 BP 神经网络输出压强的绝对误差值,如图 12(a)、(b)所示。使用训练好的 BP 神经网络对不同压力进行温度补偿,对 FBG 传感数据进行融合处理后,压力传感器的温度漂移率仅为  $1.2 \times 10^{-4} \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ,在抓取目标物体温度变化相同的情况下,温度稳定性得到明显提高。

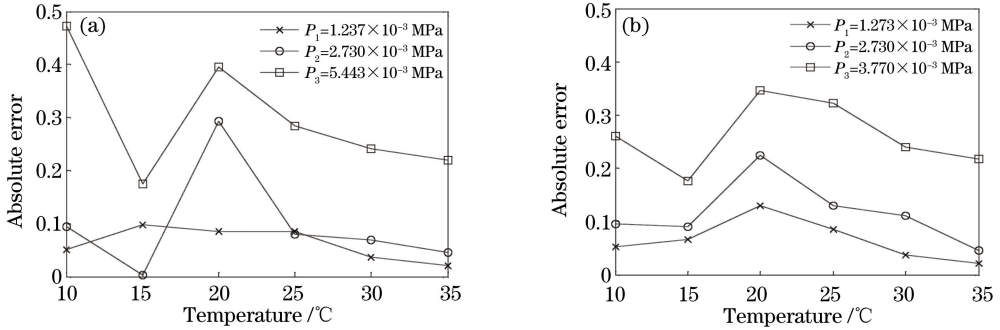


图 12 BP 神经网络输出压强的绝对误差值。(a)  $FBG_1$ ; (b)  $FBG_2$

Fig. 12 Absolute error of output pressure of BP neural network. (a)  $FBG_1$ ; (b)  $FBG_2$

## 5 结 论

提出了一种可以应用于机械手指的 FBG 触觉传感方法,通过增强 FBG 与聚合物材料之间黏接力(FBG 拉伸长度的相对变化量  $\Delta L/L$  由  $3.35 \times 10^3 \mu\epsilon$  提升至  $4.45 \times 10^4 \mu\epsilon$ ),可有效提高 FBG 对压力的灵敏度。实验结果表明,埋置于封装体中的 FBG 压力传感器可以实现对正向压力的无迟滞传感,其中心波长漂移量与正向压力呈良好的线性关系,灵敏度系数  $K_p = 0.194 \text{ pm}/\text{Pa}$ 。采取在传感单元中封装不受力的 FBG 温度传感器的方法,并利用 BP 神经网络补偿和修正压力的测量数据。实验结果表明,在抓取目标物体温度变化相同的情况下,FBG 压力传感器的温度漂移率为  $1.2 \times 10^{-4} \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。在实际测量时,根据 FBG 实测的压力和温度信号可得到补偿和修正后的压力测量值,消除了温度对应变测量结果的影响。

## 参 考 文 献

[1] Zhao Dongbin, Zhang Wenzeng, Du Dong, *et al.* Abroad research status of PVDF tactile sensor for robot [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2001, 23(6): 428-432.  
赵冬斌, 张文增, 都 东, 等. 机器人用 PVDF 触觉传感器的国外研究现状[J]. *压电与声光*, 2001, 23(6): 428-432.

[2] Du Yangang, Pan Yingjun, Liu Jiamin. Research on three-axis tactile sensing head based on PVDF film [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(s4): 215-218.  
杜彦刚, 潘英俊, 刘嘉敏. 基于 PVDF 压电膜的三向力触觉传感头研究[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(s4): 215-218.

[3] Kim Y K, Kim K, Lee K R, *et al.* Technology development of silicon based CMOS tactile sensor for robotics applications[C]. 5<sup>th</sup> IEEE Conference on Sensors, 2006: 9718383.

- [4] Lu Xin, He Mingxuan, Li Yuan, *et al.* Design of capacitance detecting system based on capacitive sensing probe[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2011, 30(12): 95-97.  
卢 歆, 何明轩, 李 源, 等. 基于电容式传感测头的电容检测系统的设计[J]. *传感器与微系统*, 2011, 30(12): 95-97.
- [5] Liu Xiujuan, Xu Xiangjian. A tactile sensor using optical waveguide[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2002, 23(s3): 127-129.  
刘秀娟, 许湘剑. 一种采用光波导的触觉传感器[J]. *仪器仪表学报*, 2002, 23(s3): 127-129.
- [6] Wang Fujun, Liu Li. Research on tactile sensor using magnetic-sensitive Z-element[J]. *Electrical Measurement & Instrument*, 2000, 37(3): 37-38.  
王福军, 刘 莉. 基于磁敏 Z 元件触觉传感器的研制[J]. *电测与仪表*, 2000, 37(3): 37-38.
- [7] Shimojo M, Namiki A, Ishikawa M, *et al.* A tactile sensor sheet using pressure conductive rubber with electrical-wires stitched method[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2004, 4(5): 589-596.
- [8] Guo Xiaohui, Huang Ying, Teng Ke, *et al.* Modular design and implementation of flexible artificial skin with temperature and pressure sensors[J]. *Robot*, 2015, 37(4): 493-498.  
郭小辉, 黄 英, 腾 珂, 等. 柔性温度压力仿生皮肤的模块化设计与实现[J]. *机器人*, 2015, 37(4): 493-498.
- [9] Heo J S, Kim J Y, Lee J J. Tactile sensors using the distributed optical fiber sensors[C]. *3<sup>rd</sup> International Conference on Sensing Technology*, 2008: 10415799.
- [10] Yu Youlong, Xue Hang, Wang Yanxiao, *et al.* Temperature distributed sensing technique for the local-area of the surface based on fiber Bragg gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(5): 506001.  
余有龙, 薛 航, 王彦晓, 等. 基于光纤光栅的物体表面附近温度场测量[J]. *光子学报*, 2014, 43(5): 0506001.
- [11] Sun Shihui, Yu Youlong, Li Hui, *et al.* Detection technique of stress waves based on fiber Bragg grating[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(5): 0505002.  
孙诗惠, 余有龙, 李 慧, 等. 基于光纤光栅的应力波检测技术研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0505002.
- [12] Si Duanfeng, Chang Bingguo, Liu Junhua. The research on the new compensation method of sensor's performance based on BP artificial neural networks[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2000(1): 11-13.  
司端锋, 常炳国, 刘君华. 基于 BP 神经网络的传感器特性补偿新算法的研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2000(1): 11-13.
- [13] Shao Jun, Liu Junhua, Qiao Xueguang, *et al.* Study on increasing selectivity of fiber Bragg grating pressure sensor with BP neural network[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, 20(7): 1531-1534.  
邵 军, 刘君华, 乔学光, 等. 利用 BP 神经网络提高光纤光栅压力传感器的选择性[J]. *传感技术学报*, 2007, 20(7): 1531-1534.
- [14] Zhu Daqi, Yu Shenglin. Data fusion algorithm based on D-S evidential theory and its application for circuit fault diagnosis[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(2): 221-223.  
朱大奇, 于盛林. 基于 D-S 证据理论的数据融合算法及其在电路故障诊断中的应用[J]. *电子学报*, 2002, 30(2): 221-223.
- [15] Mu Chundi, Ye Jun. Bayesian network for data mining[J]. *Journal of Software*, 2000, 11(5): 660-666.  
慕春棣, 叶 俊. 用于数据挖掘的贝叶斯网络[J]. *软件学报*, 2000, 11(5): 660-666.
- [16] Wu Junjie, Hou Hongjuan, Yang Yongping. Application of neural network algorithm in steam turbine's exhaust enthalpy estimation[J]. *Thermal Power Generation*, 2014, 43(8): 125-130.  
吴俊杰, 侯宏娟, 杨勇平. 神经网络算法在汽轮机排汽焓估算中的应用[J]. *热力发电*, 2014, 43(8): 125-130.