光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250521001

植入式光纤光栅融合神经网络的仿生吸盘触觉感知方法

张钰涵[1,2]*，张华富[1,2]，李忻宇[1,2]，孙广开[1,2]，祝连庆[1,2]

（北京信息科技大学 1. 光纤传感与系统北京实验室，北京 100192；
2. 光电测试技术及仪器教育部重点实验室，北京 100016）

摘　要： 生物组织的无损吸附固定是机器人手术、康复医疗等领域的共性需求，但传统吸盘容易过度吸附从而造成组织损伤。针对这一问题，文章提出一种植入式光纤光栅融合神经网络的仿生清道夫鱼吸盘触觉感知方法。通过模仿清道夫鱼高度进化的吸盘，制备变刚度仿生吸盘结构；设计基于光纤光栅的触觉感受器，将其植入到仿生吸盘柔软的唇盘结构；采用RBF神经网络，处理触觉感受器信号，实现对接触位置与接触力大小的预测。研究结果表明，利用光纤光栅和神经网络对仿生吸盘接触位置的预测准确率最优可达96.15%，对接触力大小预测的平均绝对百分比误差最小仅为3.76%。该方法能够准确预测仿生吸盘与组织的接触状态，为避免造成组织压迫损伤提供触觉反馈，在生物医学等领域具有应用价值。

关键词： 仿生吸盘；组织损伤；光纤光栅传感器；神经网络；触觉感知

中图分类号： TP212　**文章编号：** 1001－5868(2025)05－0899－08

Bionic Suction Cup Tactile Sensing Method Based on Implantable Fiber Bragg Grating Integrated with Neural Network

ZHANG Yuhan[1,2], ZHANG Huafu[1,2], LI Xinyu[1,2], SUN Guangkai[1,2], ZHU Lianqing[1,2]

(1. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, CHN; 2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, CHN;)

Abstract: Nondestructive adhesion fixation of biological tissues is a common requirement in fields such as robotic surgery and rehabilitation medicine. However, traditional suction cups are prone to excessive adhesion, which can cause tissue damage. To address this issue, a bionic scavenger fish sucker tactile perception method that integrates an implanted fiber Bragg grating and neural network is proposed. A variable-stiffness bionic sucker structure was fabricated by imitating the highly evolved sucker of a scavenger fish. A tactile sensor based on a fiber Bragg grating was designed and implanted into the soft lip structure of the bionic sucker. A radial basis function neural network was employed to process the tactile sensor signals, enabling the prediction of the contact position and contact force magnitude. The results show that the contact position of the bionic sucker using fiber Bragg grating and a neural network was optimal up to a prediction accuracy of 96.15%, and the average absolute percentage error of the contact force magnitude prediction could be minimized to only 3.76%. This method can accurately predict the contact state between the bionic sucker and tissue, providing tactile

收稿日期：2025－05－21.

* 通信作者：张钰涵

feedback to avoid tissue compression damage, with applications in biomedicine and other fields.

Key words: bionic sucker; tissue damage; fiber grating sensor; neural network; tactile sensing

0 引言

生物组织的无损吸附在机器人辅助手术、康复医疗等领域具有重要的应用价值,特别是对实施牵引、固定、抓取器官组织等操作至关重要。要实现生物组织的无损吸附,不仅需要能够稳定吸附固定组织的吸附装置,还需要吸附装置具备能够实时监测与组织损伤相关物理量的触觉感知功能,从而确保操作过程的安全性与精准性。

围绕生物组织的吸附问题,国内外研究学者从自然界具有吸附机制的生物中汲取灵感,持续开展对仿生吸附机制的研究,并取得了一系列成果。Chen等[1]针对手术钳抓取软组织时易造成损伤的问题,受树蛙脚趾垫的吸附机制启发,设计了六边形微柱手术钳,在猪肝脏的抓取实验中,相比传统齿状钳能有效减少组织损伤。Hwang等[2]受章鱼吸盘表面微齿结构启发,开发了一种带柔性微齿的仿生章鱼吸盘,集成三个吸盘的柔性执行器成功实现在水下抓取猪心脏、肝脏等生物样本。Lee等[3]集成折纸结构与仿章鱼吸盘阵列提出的生物粘合剂,在湿润猪腭上的附着强度是传统平面粘合剂的两倍。Wang等[4]设计的带刚度梯度和髓臼凸起的仿生章鱼吸盘,在猪心等生物表面实现无明显损伤的吸附,为手术中柔软曲面组织的抓取提供了新方案。

对于吸附装置的触觉感知研究,国内外研究人员也已取得了一定的进展。Aoyagi等[5]提出在传统真空吸盘表面涂覆导电聚合物PEDOT薄膜的方法,通过监测薄膜电阻变化,实现对外力的检测。Hao等[6]受章鱼启发,利用摩擦纳米发电机(TENG)开发了一种触觉感受器,实现在复杂水下条件下进行物体检测与材料识别。Shahabi等[7]在人工吸盘中集成嵌入式应变传感器,用于检测与物体接触的角度和材料硬度。Xie等[8]在仿章鱼手臂中加入了液态金属电子电路,能够主动感知吸盘的附着与脱离。Sareh等[9]在吸盘的机械结构中集成基于光纤传感原理的单一传感单元,能够无缝测量接近度,衡量吸盘锚定的牢固程度。

然而,现有的仿生吸附研究主要集中在牢固吸附组织上,吸附装置的触觉感知研究主要聚焦在外力检测、材料识别及有无接触等较为单一的参数上。如何在牢固吸附形状不规则的生物组织的同时,感知与组织损伤相关的物理量,仍然是一个亟待解决的问题。为此,本文提出一种植入式光纤光栅融合神经网络的仿生清道夫鱼吸盘触觉感知方法。在前期的研究成果中[10],通过模仿清道夫鱼的吸盘结构,实现对生物组织的牢固吸附功能。本研究将在此基础上,通过在吸盘唇部植入光纤光栅传感器同时融合神经网络,实现对接触压力大小及其位置分布的感知功能,在生物医学等领域具有重要的应用价值。

1 触觉感知吸盘系统组成

1.1 仿生清道夫鱼吸盘制备

基于清道夫鱼吸盘的形态学特征,制造了一种具有刚度梯度的仿生软体吸盘。仿生吸盘包括腔体与唇盘上、下两个部分,吸盘唇盘长为52.1 mm,宽为37.25 mm,吸盘高为40.5 mm,质量为27 g。通过模仿清道夫鱼吸盘的生物学与材料学特性,利用液体硅胶分步注塑成型的方法制备仿生吸盘,吸盘的上、下部分各使用了不同硬度的硅胶材料。选用邵氏硬度为00-50的Ecoflex 00-50硅胶材料,模拟唇部软组织特性,确保接触面自适应密封。采用邵氏硬度为30A的Dragon Skin 30硅胶材料制备腔体,提供结构刚度以维持吸附压差,保障负压吸附力。将配备完成的Ecoflex 00-50硅胶混合液注入下模具,室温固化2 h(总固化时间为3 h),在材料界面未完全固化时,组装模具,并灌注配备完成的Dragon Skin 30硅胶混合液(总固化时间为16 h),促进两种硅胶材料界面融合,防止漏气。待硅胶液完全固化后脱模,可获得具有刚度梯度的仿生清道夫鱼软体吸盘,如图1所示。

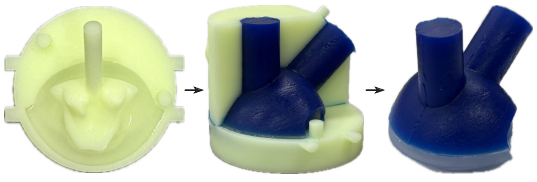


图1 仿生清道夫鱼吸盘的制备

1.2 光纤触觉感受器设计与植入

清道夫鱼具有高度进化的触觉感知系统,能够

对吸附状态进行有效感知，既能保持稳定的吸附状态，又能避免因过度吸附造成自身唇盘组织的损伤。这得益于清道夫鱼的唇盘组织结构中嵌入了丰富的感觉细胞与神经末梢，这些感觉细胞和神经末梢主要分布在唇部的表皮层与真皮层。当唇盘与基质发生接触时，机械力通过触觉感受器传递至神经元，触发离子通道开放，产生动作电位，再传递至大脑，经整合后驱动后续的行为。为模仿清道夫鱼吸盘的这一特性，设计了一种光纤触觉感受器。以光纤布拉格光栅（Fiber Bragg Grating，FBG）作为敏感元件，利用其纤细、柔软、易包覆或嵌入进柔软硅胶基质中的特点，植入在仿生清道夫鱼吸盘的唇部位置，感受唇盘组织受力产生的形变。选用基于飞秒激光方法制备的光纤光栅，飞秒激光可以透过涂覆层直接在光纤的纤芯中制备光栅，与紫外激光相位掩膜法制备的光栅相比，保留了光纤原有的机械强度，更加抗压、抗弯且长期稳定性好。如图2所示，分别在仿生吸盘的上唇左右两侧与下唇中央处植入光纤感受器，植入位置位于两种硅胶材料交界处下方2 mm处，植入深度为5 mm。植入后再次使用同种硅胶进行封装，以防止FBG位置发生移动，图中红色线条为FBG所在位置。

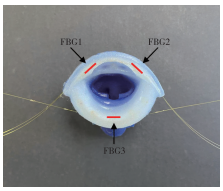


图2　植入FBG传感器的仿生清道夫鱼吸盘

图2中的吸盘分别在上唇的左部、右部和下唇的中央各植入1个FBG，中心波长分别为1 535 nm，1 541 nm，1 543 nm，栅区长度均为10 mm。FBG具体性能参数中心波长（CWL）、反射率、半峰全宽（FWHM）和边模抑制比（SLSR）如表1所示。

表1　FBG具体性能参数

性能参数	FBG1	FBG2	FBG3
CWL/nm	1 534.96	1 541.02	1 542.96
反射率/%	60.1	64.9	54.7
FWHM/nm	0.28	0.28	0.27
SLSR/dB	25.3	22.2	24.2

当一束宽光谱进入光纤光栅时，满足光纤光栅布拉格条件（1）的入射光将产生反射，其余波长透过光纤光栅继续传输。对于光纤布拉格光栅，波长λ_B为入射光通过光纤布拉格光栅反射波波峰处波长，也即中心波长：

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

式中，Λ为光栅周期，n_{eff}为光纤纤芯的有效折射率。两个参量均会受到外界环境因素的影响，如温度、应变等，从而导致FBG的中心波长发生变化。

当FBG处于应变场中时，光栅周期Λ的变化和有效折射率n_{eff}的变化会同时作用，导致FBG的中心波长λ_B发生漂移。经推导[11]，可表示为：

$$\Delta\lambda_B = 2(\Delta n_{eff}\Lambda + n_{eff}\Delta\Lambda) = K\lambda_B\varepsilon \tag{2}$$

式中，$\Delta\lambda_B$为光纤光栅中心波长漂移量，K为应变灵敏系数，ε为轴向应变。

当仿生吸盘接触物体并受力时，其柔软的唇盘产生的形变通过硅胶介质传导至植入在其中的光纤触觉感受器，从而引发FBG的光谱偏移，如图3所示。

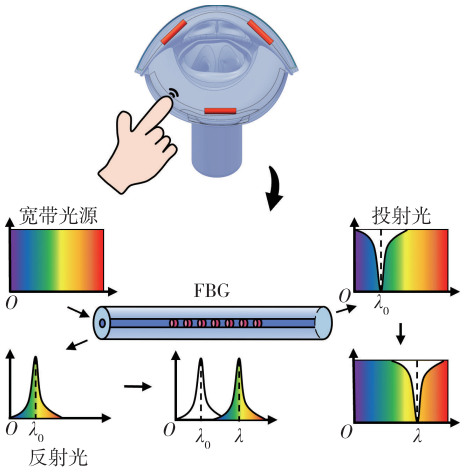


图3　触觉感受器的传感原理

2　仿生吸盘触觉响应特性

FBG传感器对于应力和温度交叉敏感，而在仿生吸盘的实际应用中，组织温度以及环境温度的变化会对植入在其中的FBG中心波长偏移产生影响，从而影响对触觉信号的获取。因此，需将温度变化产生的影响进行剥离，实现对触觉传感信号的有效解耦。在保证温度条件（实验室温度为25℃）不变的情况下，搭建触觉传感响应测试平台，模仿不同的触觉信号（点触觉信号、面触觉信号），观察FBG的光谱偏移情况，验证传感方案的可行性，分析光纤感受器的触觉响应特性。

2.1　温度信号的处理

搭建温度特性测试平台，如图4所示。测试对象为植入FBG的仿生吸盘、包覆同种硅胶材料

（Ecoflex 00-50硅胶）的FBG以及无任何包裹材料的FBG（裸纤）。

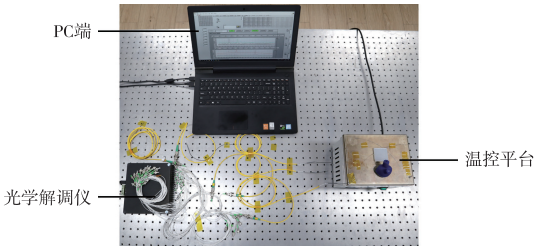


图4 温度特性测试平台

实验温度范围设定在20℃～40℃，以2℃为步长改变数控温控平台的设定温度，实验过程中FBG均不受外力。待温度稳定维持5分钟后，记录FBG的中心波长数据。重复4次实验，以20℃的中心波长作为初始中心波长，计算不同温度条件下FBG的中心波长偏移量，所得温度特性曲线如图5所示。

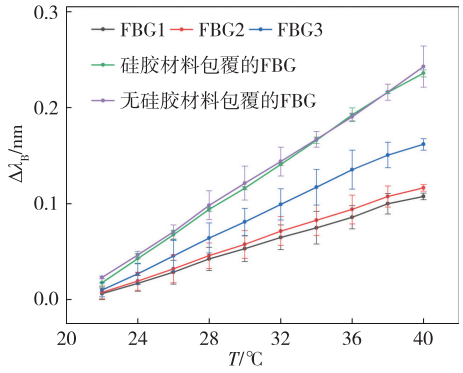


图5 20℃～40℃范围内FBG温度特性曲线

实验结果表明，植入在吸盘中的FBG（FBG1，FBG2，FBG3）、包覆硅胶材料的FBG以及无任何包裹材料的FBG的温度特性曲线具有良好的线性关系，拟合系数分别为0.998 7，0.999 0，0.998 1，0.999 5，0.999 6，均大于0.99。与裸光纤相比，植入在吸盘中的FBG以及包覆在硅胶材料中的FBG的波长偏移量误差相较裸纤的更小。这是因为裸露的光纤与环境之间会进行热交换，且实验过程中会有气流扰动，从而导致中心波长产生漂移噪声。而硅胶材料对光纤光栅的包裹，会对漂移噪声有一定的抑制作用。在20℃～40℃温度范围内，硅胶材料的热膨胀对FBG波长偏移的非线性影响可以被忽略。因此，由硅胶材料封装的FBG可作为仿生吸盘的温度参考FBG，在使用过程中仅对温度敏感。植入在吸盘中的FBG触觉感受器可通过参考FBG检测到的温度信息，进行温度补偿，从而分离由温度变化导致的波长偏移，实现对触觉信号的解耦。

2.2 点触觉响应实验

为验证在仿生吸盘中植入FBG是否具备作为触觉感受器的能力，实验使用金属尖头对吸盘唇盘的各位点施加外力，模仿吸盘唇盘局部点受力的触觉信号，观察FBG的波长偏移情况。如图6所示，在吸盘上对金属尖头要施加外力的位置进行标记，上唇和下唇各设置5个施力位置。

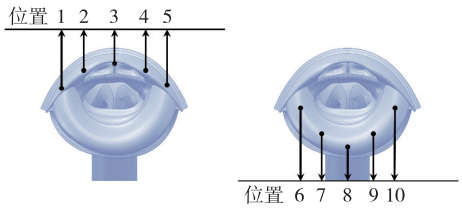


图6 仿生吸盘唇部点施力标记

触觉传感响应测试平台如图7所示，包括两个三轴位移平台、测力仪、吸盘固定装置、植入了光纤传感器的仿生吸盘、光学解调仪、用来采集及储存数据的PC。

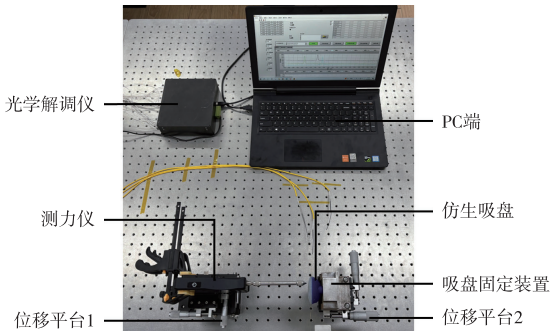
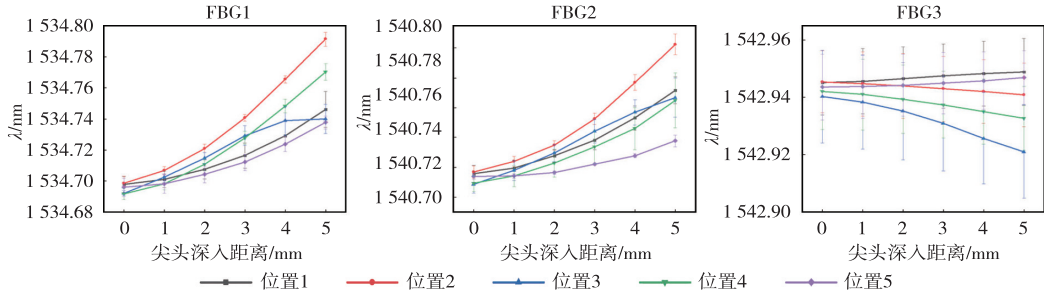
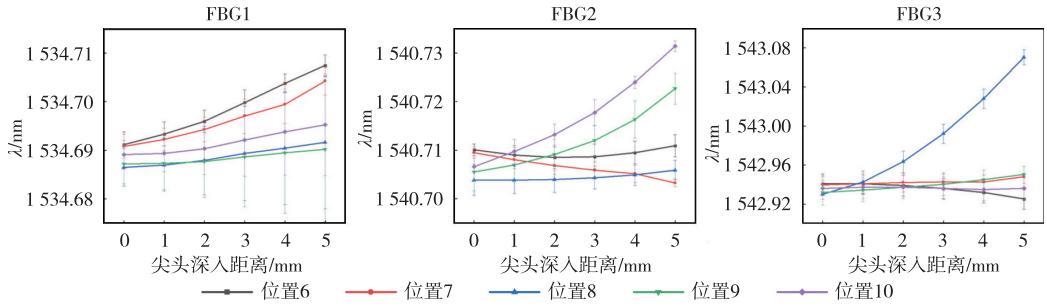


图7 触觉传感响应测试平台

左右两个位移平台如图7中相对而放，位移平台1固定测力仪，测力仪末端连接金属尖头；位移平台2固定吸盘夹具，将吸盘面朝测力仪上的金属尖头放置。通过调节位移平台，至金属尖头与唇部标记位置对正，当接触零载荷时，采集光纤传感器的初始中心波长λ_0。调节位移平台1，以1 mm为步长，向吸盘法向推进，尖头挤压硅胶组织，致使测力仪示值与FBG中心波长同步变化。为观察不同位置受到相同挤压程度时各FBG的传感效果，以固定位移间隔的方式对吸盘唇部各标记位置进行挤压施力，步长1 mm，最大挤压量为5 mm，以避免吸盘结构损伤。每次步进后，采集并存储光纤感受器的中心波长λ。在完成单点测试后，复位位移平台并更换挤压的位置。重复三次点触觉响应实验，处理得到三个FBG在吸盘上唇和下唇各位置受力时中心波长的变化情况，如图8所示。



（a）上唇局部点受力



（b）下唇局部点受力

图 8　仿生吸盘唇部点受力时 FBG 中心波长变化情况

由图 8 可知，当金属尖头在上唇的各个位置施加外力时，植入在上唇的光纤感受器（FBG1，FBG2）响应明显，产生较大光谱偏移。同理，当金属尖头在下唇的各个位置施加外力时，植入在下唇的光纤感受器响应明显，尤其在 FBG3 附近的位置，中心波长偏移量更大，且具有一定特征性。这种现象可归因于下唇的结构与上唇相比更为平整，局部受力时应力分布更均匀。实验结果显示，FBG 的偏移趋势较为一致，但存在 0.02 nm 左右的波长波动，这是由于多次重复实验，硅胶作为超弹性材料，未能让 FBG 恢复相同的初始状态。总体而言，通过使用金属尖头模拟点触觉信号，验证了在仿生吸盘唇部植入 FBG 的传感方案具有一定可行性，光纤传感器具备作为触觉感受器的能力。

2.3　区域触觉响应实验

通过使用金属平面对仿生吸盘唇部的各个区域施加外力，模仿吸盘唇盘区域受力时的触觉信号。如图 9 所示，在吸盘上对金属平面要施加外力的区域进行划分，将整个吸盘的唇盘分为 4 个区域，上唇、下唇各设置 2 个区域。

为观察当吸盘在部分区域与物体发生力的作用，剩余区域不与物体发生接触时，光纤感受器的中心波长偏移情况，通过制作不同形状、不同大小的金属平面，模拟吸盘与不同形态的物体发生接触时产生的力的作用。根据排列组合，分别对一个、

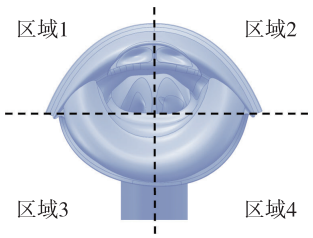


图 9　仿生吸盘唇部区域划分

两个、三个、四个区域进行区域接触，共计有 $C_4^1+C_4^2+C_4^3+C_4^4=15$ 种接触方式。图 10 所示为所制作的不同尺寸的金属平面，替换点触觉响应中测力仪连接的金属尖头。

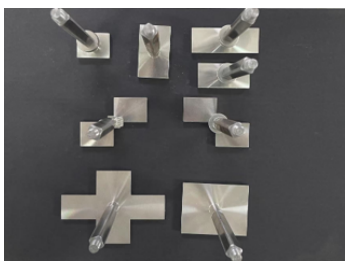
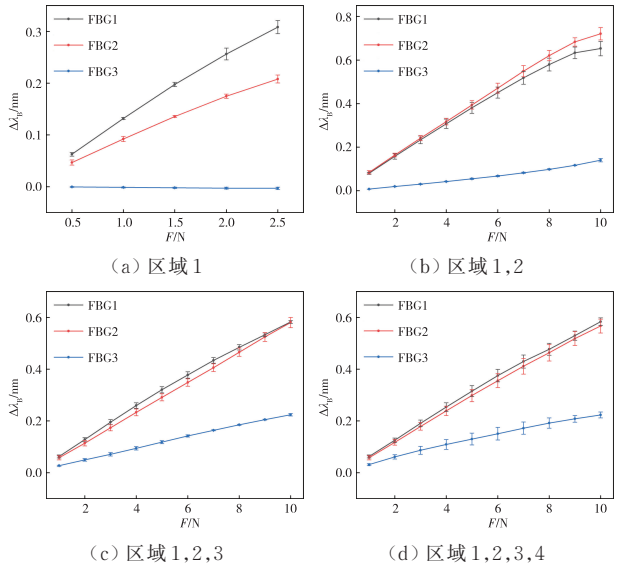


图 10　用于区域面施力的金属平面

区域面施力更接近于实际应用中吸盘会遇到的受力情况，在此以固定力值间隔的方式替换固定位移间隔的方式，对吸盘施加不同大小的外力，并记录测力仪示值 F。通过调节位移平台，至金属平面与唇部划定区域对正，当接触零载荷时，采集光纤传感器的初始中心波长 λ_0。针对接触一个区域的

情况，以0.5 N为步长向吸盘法向推进，待每次载荷稳定后，采集FBG中心波长λ以及测力仪示值，步进至2.5 N后停止推进，防止吸盘结构损伤。在完成数据采集后，复位位移平台并更换挤压区域。当接触面积较大时（非单区域受力），外力施加范围为0～10 N，步长设置为1 N，采集FBG中心波长数据以及测力仪示数。重复四次面触觉响应实验，处理得到FBG中心波长偏移量变化情况与受力大小间的关系如图11所示。



（a）区域1　（b）区域1,2

（c）区域1,2,3　（d）区域1,2,3,4

图11　仿生吸盘唇部区域受力时FBG中心波长偏移量变化情况

图11中的数据结果表明，当对不同区域施加外力时，三个触觉感受器的中心波长偏移量与受力大小间呈现出良好的线性度、规律性与特征性。在多次重复实验中，波长偏移量的最大误差约为0.03 nm，这主要是由于硅胶材料质地柔软，当受到外力挤压发生应变时，难以保证每次形变的方式一致，从而造成不确定的细小误差。

3　仿生吸盘触觉感知

在应变传导的过程中，作为超弹性体的硅胶材料会将一部分外力转化为弹性势能。这一过程是复杂且不可知的，即使已知导致吸盘发生形变的外力，传导至光纤感受器的应变也不可知，且在不同区域施加外力时，光纤感受器的响应特性也不同。因此，本文通过神经网络的手段，对受力位置与受力大小分别进行预测感知。

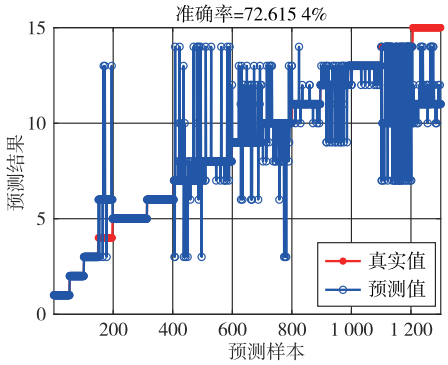
3.1　触觉感知神经网络模型

利用多任务学习的方法，分别采取分类预测与回归预测两种方式，实现对仿生吸盘受力位置与受力大小的感知。用于神经网络训练的数据集由区域触觉响应实验中采集的数据处理得到，输入数据为FBG在不同受力位置与不同受力大小下与初始波长间的偏移量，输出数据分别为接触方式编号与受力大小。其中，接触方式的编号按照接触一个、两个、三个、四个区域的顺序依次排列（如，编号1：区域1；编号4：区域4；编号5：区域1＋2；编号11：区域1＋2＋3；编号15：区域1＋2＋3＋4）。每种接触方式，在不同的接触力下共采集10个数据样本，处理得到的数据集合计5 200组数据样本，以3∶1的比例随机划分成训练集与测试集。选择了两种类型的神经网络：BP神经网络与RBF神经网络，设置输入层节点数为3，输入数据为三个FBG的中心波长偏移量。分类预测的输出数据为接触方式的编号，共15类，输出层节点数为15；回归预测的输出数据为受力大小，输出层节点数为1。BP神经网络的隐藏层节点数均设定为10，训练函数设置为Levenberg-Marquardt算法，隐藏层和输出层的激活函数分别设置为Tansig函数和Purelin函数。而RBF神经网络的隐藏层节点数通过网络在训练过程中根据需求通过高斯径向基函数自动确定得到的，其中分类问题设置的目标误差为0.01，径向基的宽度参数Spread设置为0.1，回归问题设置的目标误差为0.05，径向基的宽度参数Spread设置为0.2，输出层的激活函数设置为线性函数。为确保模型性能的稳定性与可重复性，训练重复20次。在训练与测试结束后，对两种模型的预测结果与评估指标进行对比分析。

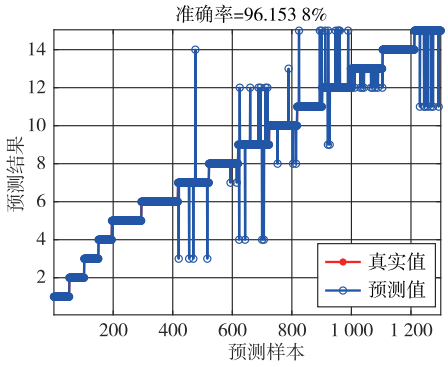
3.2　触觉感知结果与分析

BP神经网络与RBF神经网络对仿生吸盘受力位置的预测结果与混淆矩阵如图12。神经网络共计对15种不同的接触方式进行分类预测，其中，第15类为对整个吸盘唇盘施加触觉信号的情况。

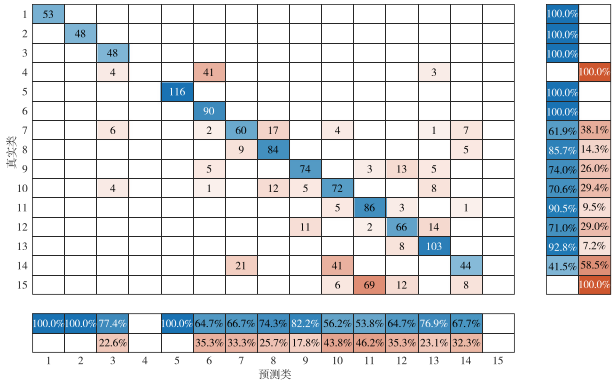
BP神经网络与RBF神经网络对受力位置的感知结果如表2所示。基于测试集数据，BP神经网络和RBF神经网络对受力位置预测的准确率最高分别可达72.62%，96.15%，平均分别可达68.05%，93.93%。可见，RBF网络相较于BP网络更适合于对受力位置的预测。当对接触位置的预测不为全区域接触（第15类）时，可为操作人员对吸附装置的



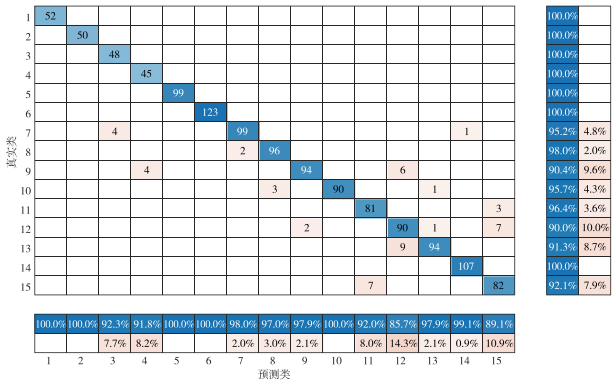
（a）BP 神经网络预测结果



（b）RBF 神经网络预测结果



（c）BP 神经网络混淆矩阵



（d）RBF 神经网络混淆矩阵

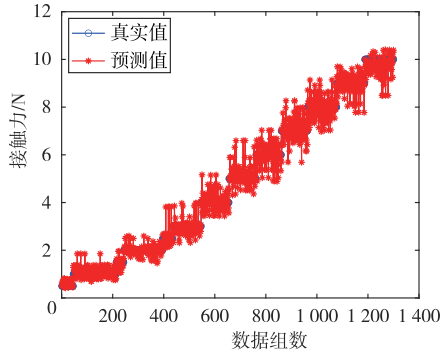
图 12　BP 神经网络与 RBF 神经网络基于测试集数据对接触位置的预测结果

固定位置或固定角度提供调整信息，以便吸盘与组织间实现完整贴合，形成密封空间。

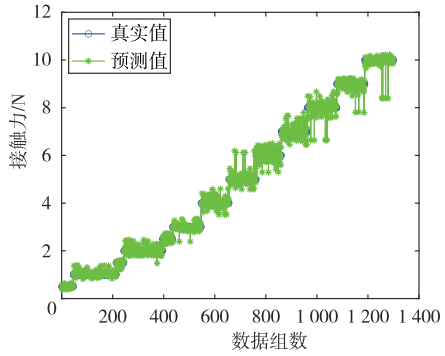
表 2　BP 神经网络与 RBF 神经网络对受力位置感知准确率对比

准确率	*BP*	*RBF*
最大	72.62%	96.15%
最小	63.15%	92.54%
平均	68.05%	93.93%

BP 神经网络与 RBF 神经网络对仿生吸盘受力大小的预测结果如图 13 所示，评估指标分别如表 3 和表 4 所示，其中包括平均绝对误差（Mean Absolute Error，MAE）、均方误差（Mean Square Error，MSE）、均方根误差（Root Mean Square Error，RMSE）、平均绝对百分比误差（Mean Absolute Percentage Error，MAPE）、预测时间 t。



（a）BP 神经网络预测结果



（b）RBF 神经网络预测结果

图 13　BP 神经网络与 RBF 神经网络基于测试集数据对接触力大小的预测结果

表 3　BP 神经网络对受力大小感知评价指标

性能指标	*MAE*	*MSE*	*RMSE*	*MAPE*	*t*/ms
最大	0.288 1	0.178 5	0.422 6	8.32%	25.8
最小	0.233 6	0.114 0	0.337 7	6.71%	7.09
平均	0.253 2	0.136 9	0.369 4	7.40%	15.8

实验结果显示，在对接触力大小的预测中，基于测试集数据，RBF 神经网络预测结果的误差指标

表4 RBF神经网络对受力大小感知评价指标

性能指标	*MAE*	*MSE*	*RMSE*	*MAPE*	*t*/ms
最大	0.154 2	0.063 6	0.252 2	4.63%	48.3
最小	0.132 1	0.048 1	0.219 4	3.76%	11.9
平均	0.144 0	0.055 1	0.234 4	4.18%	22.3

均小于BP神经网络,BP网络的预测时长略短于RBF网络。以平均绝对百分比误差作为评价模型的性能指标,RBF神经网络更适合对接触力大小进行预测。对接触力大小的感知可为操作人员提供压迫力度的数据信息,便于在稳定固定允许的范围内对下压程度进行调整,避免对组织过度压迫而造成损伤。

总体而言,将FBG传感器阵列作为触觉感受器植入在仿生清道夫鱼吸盘中,并结合神经网络对触觉感受器的应变信号进行运算处理,能够准确对仿生吸盘唇盘与组织间的触觉信息进行预测感知,并及时提供接触状态反馈。

4 结论

针对吸附装置在对生物组织进行吸附固定过程中造成的组织损伤问题,本文在仿生清道夫鱼吸盘的研究基础上,设计了一种基于光纤光栅传感器阵列的触觉感受器,并将其植入到仿生清道夫鱼吸盘的唇部,传感仿生吸盘受到的触觉信号。通过多任务学习的方法,利用神经网络分别对仿生吸盘唇部的受力位置与接触力大小进行预测感知。实验结果表明,RBF神经网络对受力位置预测的准确率最高可达96.15%,平均可达93.93%,相较于BP神经网络的预测准确率提升了25.88%。RBF神经网络对接触力大小的预测*MAPE*最小仅为3.76%,平均水平为4.18%。这种具有触觉感知能力的仿生吸盘能够准确及时地对接触状态进行数据反馈,为避免由于固定过度而造成的组织损伤问题提供了一种新的思路。

在本文对仿生吸盘触觉感知的研究中,未考虑FBG传感器在植入过程中与硅胶材料间是否为理想粘附状态。未来研究将进一步优化FBG传感器的植入方案,建立结构更加完整的触觉感知模型,以实现对更多与组织损伤相关物理量的识别,提高仿生吸盘的触觉感知水平。

参考文献:

[1] Chen H, Zhang L, Zhang D, et al. Bioinspired surface for surgical graspers based on the strong wet friction of tree frog toe pads[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(25): 13987-13995.

[2] Hwang G W, Lee H J, Kim D W, et al. Soft microdenticles on artificial octopus sucker enable extraordinary adaptability and wet adhesion on diverse nonflat surfaces [J]. Advanced Science, 2022, 9(31): 2202978.

[3] Lee J, Park H K, Hwang G W, et al. Highly adaptive kirigami-metastructure adhesive with vertically self-aligning octopus-like 3D suction cups for efficient wet adhesion to complexly curved surfaces [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(28): 37147-37156.

[4] Wang Y, Sun G, He Y, et al. Octopus-inspired sucker to absorb soft tissues: stiffness gradient and acetabular protuberance improve the adsorption effect[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2022, 17(3): 036005.

[5] Aoyagi S, Suzuki M, Morita T, et al. Bellows suction cup equipped with force sensing ability by direct coating thin-film resistor for vacuum type robotic hand [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(5): 2501-2512.

[6] Hao Y, Sun Y, Wen J, et al. Octopus-inspired multichannel tactile sensor for enhanced underwater material identification [J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 507: 160604.

[7] Shahabi E, Visentin F, Mondini A, et al. Octopus-inspired suction cups with embedded strain sensors for object recognition [J]. Advanced Intelligent Systems, 2023, 5(2): 2200201.

[8] Xie Z, Yuan F, Liu J, et al. Octopus-inspired sensorized soft arm for environmental interaction[J]. Science Robotics, 2023, 8(84): eadh7852.

[9] Sareh S, Althoefer K, Li M, et al. Anchoring like octopus: biologically inspired soft artificial sucker [J]. Journal of the Royal Society, Interface, 2017, 14(135): 20170395.

[10] Xiao P, Wang Z, Zhou K, et al. Hypostomus plecostomus-inspired soft sucker to adsorb slippery tissues: a stabilizing post-valvular cavity and stiffness gradient materials provide excellent adsorption performance [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2024, 19(5): 056019.

[11] 张冬伟, 金 靖, 朱云鸿, 等. FBG形状传感器应变传递与传感性能研究[J]. 半导体光电, 2020, 41(6): 833-838, 844.
Zhang Dongwei, Jin Jing, Zhu Yunhong, et al. Research on strain transmission and sensing performance of FBG shape sensor[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(6): 833-838, 844.

作者简介:

张钰涵(2000—),女,辽宁省锦州市人,硕士研究生,主要研究方向为仿生吸附与智能感知。