光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024032801

基于弱耦合多芯少模光纤光斑分析的扰动传感研究

袁　晖，刘　艳*，李广德，庞乐之

（北京交通大学 电子信息工程学院，北京 100044）

摘　要： 提出了一种基于耦合多芯少模光纤（FM-MCF）光斑检测的光纤扰动传感器结构，并进行了实验验证。该传感器采用“单模光纤-多模光纤（MMF）-多芯少模光纤”的级联光纤结构，单模激光经过MMF进行光场发散后，FM-MCF中的7个芯子都能被照亮，因此在FM-MCF的末端可以用相机接收到具有7个子光斑的光斑图像。实验中在FM-MCF不同位置处施加扰动并同时采集光斑，之后基于神经网络对变化的光斑图样进行处理以实现扰动位置分类。基于FM-MCF芯内强耦合、芯间弱耦合的特性，利用该光纤结构以3 cm的空间分辨率实现了对15个扰动位置的99.46％的高精度分类，远高于仅采用MMF通过光斑检测进行扰动定位的结果。也测试了FM-MCF传感器同时检测扰动位置和强度的能力，识别分类准确率均接近100％。实验结果表明，所提出的传感器具有成本低、结构简单、易于解调和高精度的优点。

关键词： 光纤光斑；多芯少模光纤；扰动传感；卷积神经网络

中图分类号： TN929.11　**文章编号：** 1001－5868(2024)04－0524－07

Perturbation Sensing Based on the Analysis of Specklegram from A Weakly Coupled Few-mode Multi-core Fiber

YUAN Hui, LIU Yan, LI Guangde, PANG Lezhi

(School of Electronic Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, CHN)

Abstract: A perturbation sensor based on the detection of a weakly coupled few-mode multi-core fiber (FM-MCF) specklegram was proposed and experimentally demonstrated. The sensor has a cascaded fiber structure consisting of a "single mode fiber-multi-mode fiber (MMF)-multi-core low-mode fiber." After the light field of a single-mode laser passes through the MMF, all seven cores in the FM-MCF can be illuminated, and an image with seven sub-specklegrams can be received by a camera at the end of the FM-MCF. In an experiment, perturbation was applied to different positions of the FM-MCF and specklegrams were collected at the same time. Based on the strong-coupling characteristic of the core and weak coupling between the core, the fiber structure achieved a high precision classification of 99.46% for 15 disturbance locations, with a spatial resolution of 3 cm, which was much higher than the results for disturbance locations when using only MMF specklegram detection. The capability of the sensor to detect the perturbation position and intensity simultaneously was also tested, and the recognition accuracy was close to 100%. The experimental results showed that the proposed sensor has the advantages of low cost, a simple structure, easy demodulation, and high precision.

Key words: specklegram; few-mode multi-core fiber; perturbation sensing; convolutional neural network

收稿日期：2024－03－28.

基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFB2800901)；国家自然科学基金项目(61975009，U2006217).

* **通信作者：**刘　艳

0 引言

光纤传感技术是一种利用光纤传感介质中的光信号来监测外部环境中的扰动或变化的技术，其灵敏度高、抗电磁干扰，已被广泛应用在土木工程、机械制造等领域[1-2]。在传感应用中，除了解调扰动信号的性质之外，对扰动源位置的定位也是十分重要的。常见的扰动定位传感方案有光时域反射技术(OTDR)和光纤干涉传感技术等，其中前者是利用OTDR设备发送脉冲光信号到光纤中，通过测量光信号的反射强度和时间延迟来确定光纤中的扰动位置，适用于长距离光纤网络的扰动定位[3-5]；后者适用于对微小扰动进行高精度定位和监测，其通常需要在光纤中引入特殊结构或器件，如干涉仪等[6-7]，增加了信号解调的复杂性，成本较高。

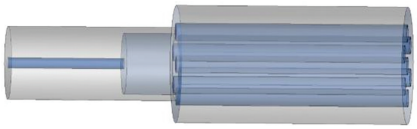
光斑图样是指当相干光在光纤内部传输时，由于模式间的相互干涉，在光纤的输出端面出现亮暗不均的斑点。在各种光纤传感技术中，基于光斑图样检测的光纤光斑传感器(FSSs)不仅对外界扰动敏感、灵敏度高，而且结构简单、成本低，典型应用有弯曲变形传感[8-9]、触觉传感[10-11]、折射率传感[12-13]等。近些年来，深度学习算法的发展进一步促进了FSSs在复杂场景的应用，如实现了一定程度的沿光纤长度的空间分辨率传感。2018年，文献[14]基于卷积网络方法，设计了一个定位多模光纤上扰动位置的系统，通过采集和训练大量的数据集分别实现了对3个和10个不同扰动点的99%和71%的分类准确率。2021年，Wei等[15]在训练样本数量有限的FSS系统中以5 cm的空间分辨率实现高精度的光纤扰动定位，并且分析了在不同光纤模式耦合条件下扰动定位传感的性能。2021年，文献[16]演示了使用深度学习方法来检测沿多模光纤(MMF)的弯曲曲率和弯曲位置，其中弯曲位置的间隔为10 cm。

本文提出了一种基于多芯少模光纤(FM-MCF)光斑检测的光纤扰动传感器结构，以较少的训练数据集实现了较高空间分辨率的光纤扰动定位传感。实验使用的FM-MCF为7芯少模结构，7个芯子间为弱耦合，芯内模式间为强耦合，其每个芯子对应的子光斑容易受外界扰动的影响，而每个芯子之间的弱耦合特性能够在一定程度上缓解小的随机环境扰动引起的模式耦合作用，因此FM-MCF能够在具有高灵敏度的同时对环境的随机扰动具有一定的鲁棒性。结合卷积神经网络(CNN)对不同扰动位置下的光斑图样进行分类处理，实现了对15个扰动点接近100%的定位准确率。另外，本文还验证了传感器同时识别扰动位置和扰动强度的能力。

1 光纤传感器结构与原理

1.1 传感器结构

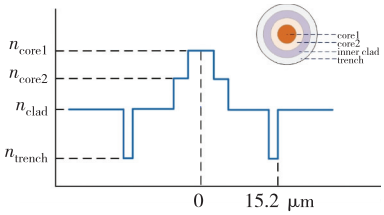
图1(a)所示为实验采用的光纤传感器结构图，由单模光纤(SMF)-多模光纤-多芯少模光纤轴心对准熔接而成。FM-MCF是由武汉长飞公司生产的，其横截面的电子显微镜图如图1(b)所示。FM-MCF具有七个相同的芯子，包括位于中心位置的一个纤芯和周围对称分布的六个旁芯；每个芯子直径约为30.4 μm，芯间距和包层直径分别约为56和200 μm。图1(c)显示了FM-MCF的单个芯子结构的折射率分布，两层不同折射率的纤芯周围分别为内包层和低折射率的沟槽辅助结构。辅助结构结合大的芯间距可以有效地抑制纤芯之间的串扰，因此FM-MCF的各芯子之间表现为弱耦合作用。在SMF和FM-MCF之间熔接一段MMF是为了将光耦合到FM-MCF的所有七个芯子中，MMF的包层直径和纤芯直径分别为125和105 μm。由于MMF对外界随机扰动非常敏感，为了减少其对传感器性能的影响，MMF的长度应尽可能短，设计其长度为3 mm。



(a) 光纤传感结构示意图



(b) FM-MCF的电子显微镜图

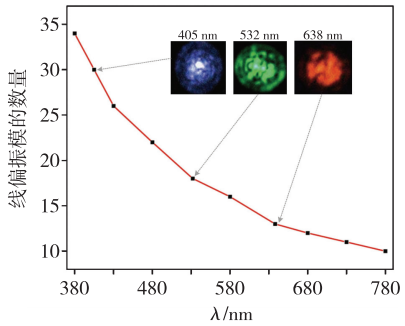


(c) 纤芯折射率分布图

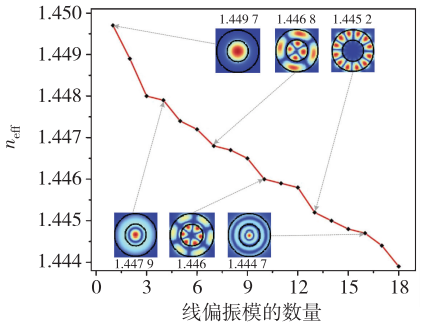
图1 光纤传感器

尽管FM-MCF的每个芯子被设计为在1 550 nm

波长下仅支持 3 种模式，但当短波长光注入时，纤芯中会存在更多模式。对 FM-MCF 的单个芯子进行了建模仿真，经过数值分析得到了其在可见光工作波长范围内支持的线偏振（LP）模的数量，结果如图 2(a)所示，显然 LP 模式的数量会随波长变短而增加。此外，分别查看了所设计的光纤传感结构在 638，532 和 405 nm 波长光源下的实际光斑图样，图 2(a)中的插图为其子光斑图。可以看出，因为纤芯在这三种工作波长下支持的模式数均大于 10，所以每个子光斑图与 MMF 光斑图相像。在后续实验中选择使用 532 nm 波长的激光器，其相干性最好，模式干涉效果最明显，光斑相对更清晰。图 2(b)显示了 532 nm 波长下不同模式的有效折射率及部分 LP 模式图，可以看出相邻模式间的有效折射率差远小于 10^{-3}，因此 FM-MCF 的各芯子内部模式间表现为强耦合作用，即传感光纤为弱耦合多芯-芯内强耦合少模光纤。



(a) 纤芯在不同波长下支持的模式数



(b) 532 nm 波长下支持的模式数

图 2　纤芯在不同波长下支持的模式数

1.2　传感原理

当传播光进入到 FM-MCF 的各芯子时，各芯子端面处子光斑图的振幅可以表示为：

$$A(x,y)=\sum_{m=0}^{M-1}a_m(x,y)\exp[\mathrm{j}\phi_m(x,y)] \quad (1)$$

式中，$a_m(x,y)$ 和 $\phi_m(x,y)$ 分别为第 m 个模式的振幅和相位。之后，由相机检测到的光斑图的强度可以表示为：

$$I(x,y)=|A(x,y)|^2=\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{M-1}a_m a_n \cdot \exp[\mathrm{j}(\phi_m-\phi_n)] \quad (2)$$

当对光纤施加扰动时，光纤折射率的分布会随光纤扰动发生变化，从而引起光纤中传输的模式间的耦合作用，导致输出光斑图发生变化，因此可以根据 FM-MCF 输出光斑图的变化推断出施加在光纤上的扰动行为。

2　光斑处理方法

2.1　预处理

在使用 CNN 对光斑图样分类之前，先对其进行了预处理，如图 3 所示为光斑图像预处理流程图。首先，为了减小冗余并保留光斑中所有空间信息，提高运算效率，针对从电荷耦合器件（CCD）采集的原始光斑图，采用边缘检测法找到光斑边缘，并沿其做外接裁剪，之后将裁剪后的光斑缩放至统一大小，即 450×450 像素。另外，为了确保分类结果是基于扰动引起的光斑图样变化，将每个扰动位置处采集到的光斑图与在没有外部扰动情况下记录的光斑图进行差分运算，再经下采样和归一化处理后作为后续分类的图像。

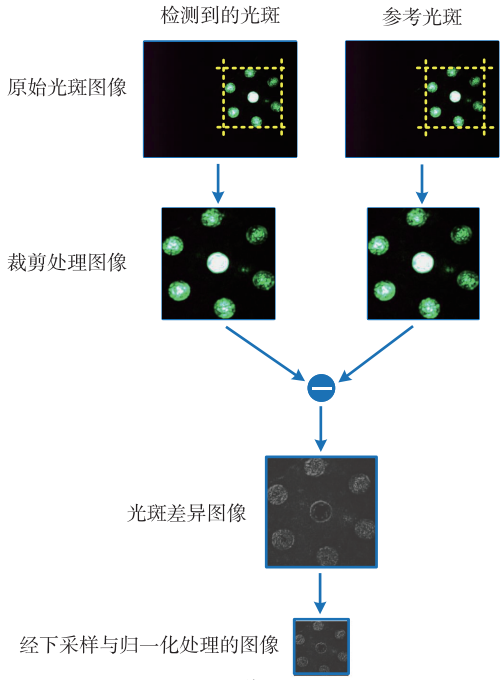


图 3　光斑图像预处理流程图

2.2　用于扰动位置分类的 CNN 模型

扰动引起的光纤输出光斑图的变化是高度非线

性的，而卷积神经网络作为一种深度学习架构，它能够从图像中学习复杂的非线性模式，利用数据中的空间相关性提取图像中的特征，在光斑图传感中表现出良好的性能。因此选择基于 CNN 建立光斑图的变化与扰动之间的关系，识别区分施加在光纤上的不同扰动位置。

用于识别扰动位置的 CNN 结构如图 4 所示，预处理后的图像为 CNN 的输入。神经网络由 3 个卷积层组成，其分别有 8、16 和 16 个大小为 3×3 的卷积核，并且在每个卷积层后面都有一个 2×2 的最大池化层，对输入光斑进行特征提取和挑选。神经网络末端的全连接层将特征图映射到样本标签空间，最后使用 Softmax 分类器进行分类，输出光纤扰动位置的分类情况。该网络是使用 Keras 框架实现的，以 Tensorflow 为后端(Python3.8)，训练过程中使用交叉熵函数来衡量预测标签和真实标签之间的差异，采用学习率为 0.001 的随机梯度下降优化算法更新网络参数。

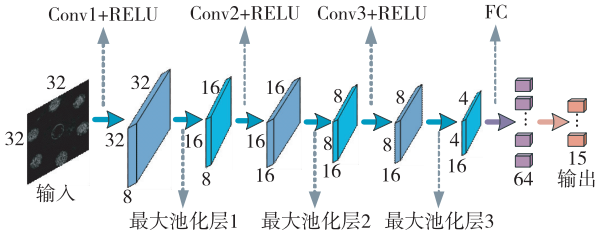


图 4 用于扰动位置分类的 CNN 结构图

2.3 用于扰动位置和强度同时分类的 CNN 模型

图 5 所示为识别区分施加在光纤的不同扰动位置和扰动强度的 CNN 结构，原始光斑图经过预处理后的图像为CNN的输入。神经网络的卷积层和池化层结构与图 4 所示的网络结构基本一致，不同之处在于，这里的网络结构的输入图片带有两个标签，一为扰动位置，二为扰动强度。相应地，该网络的末端有两个并联的全连接层，将每个特征图映射到样本标签空间，一个用于扰动位置分类，另一个用于扰动强度分类。最后使用 Softmax 计算，同时输出扰动位置和扰动强度分类情况。使用双输出层分类网络可以利用相关特征的协同作用，同时处理扰动位置和扰动强度分类任务，两个分类任务之间共享权重，这样可以减少模型的参数数量，降低过拟合的风险，并提高模型的训练速度和泛化能力，利于同时探究更多的光纤扰动性质传感应用。

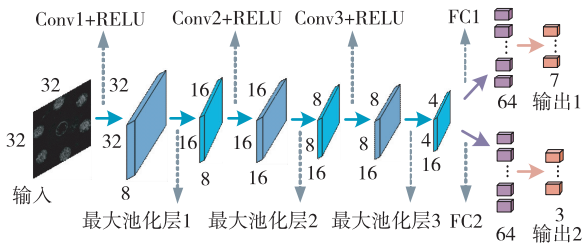


图 5 用于扰动位置和强度同时分类的 CNN 结构图

3 实验及结果分析

3.1 实验装置

实验装置如图 6 所示。来自中心波长为 532 nm 的激光器的光经 SMF 和 MMF 耦合进入 FM-MCF 中，将长约为 50 cm 的 FM-MCF 的两端固定在光纤夹具上，使用步进电机致动器在 FM-MCF 的不同位置施加受控的扰动。最后，FM-MCF 输出的光经物镜 OBJ 准直，由分辨率为 1 280×960、像素大小为 3.75×3.75 的 CCD(DFK33G445)捕获。

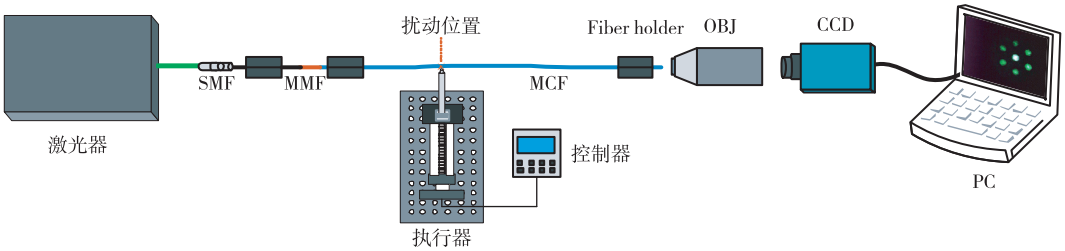
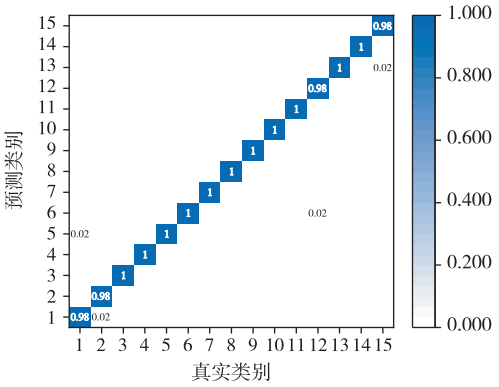


图 6 实验装置示意图

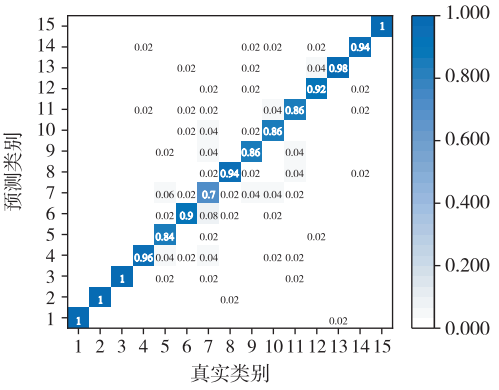
3.2 扰动位置分类实验

首先，使用步进电机致动器在 FM-MCF 中间部分的 15 个不同位置点处施加扰动，扰动点位置被标记数字 1～15，各扰动点间的距离为 3 cm。在每个扰动位置处往返采集 200 张光斑图样，共采集了 3 000 张光斑图样。对从相机直接采集到的原始光斑图先进行了预处理操作，之后将 75% 的光斑图用于模型的训练和验证，其余的 25% 用于测试。使用图 4 的网络结构进行处理后，得到了对光纤上扰动位置的识别分类结果如图 7 所示。图 7(a)中的混

淆矩阵表示扰动位置的识别精度，在现有的网络深度下，可以实现 99.46% 的高精度分类。这说明基于 CNN 模型和 FM-MCF 的光斑检测，能够在较高的空间分辨率下实现光纤扰动位置的高精度分类。



（a）FM-MCF



（b）MMF

图 7　扰动位置分类结果

为了证明所提出的基于多芯少模光纤的传感结构比采用多模光纤的方案更有优势，在相同的实验条件和数据处理方法下，对比了只采用 MMF 通过光斑检测进行扰动定位传感结果，扰动位置的识别精度结果如图 7(b)所示，其平均分类精度仅为 91.71%。为了探究两种光纤结构传感精度差异的原因，分别计算了 FM-MCF 和 MMF 在 15 个扰动位置处采集到的光斑图样的类内方差和类间方差，其公式表示为[15]：

$$J=\mathrm{tr}\left(\frac{\boldsymbol{S}_{\mathrm{b}}}{\boldsymbol{S}_{\mathrm{w}}}\right)=\mathrm{tr}\left[\frac{\sum_{J-1}^{L}N_i(\overline{A}_i-\overline{A})^{\mathrm{T}}(\overline{A}_i-\overline{A})}{\sum_{J-1}^{L}\sum_{A_k\in\theta_i}(A_k-\overline{A})^{\mathrm{T}}(A_k-\overline{A})}\right] \tag{3}$$

式中，$\boldsymbol{S}_{\mathrm{b}}$ 和 $\boldsymbol{S}_{\mathrm{w}}$ 分别表示类间和类内散布矩阵，$L=15$ 表示扰动位置的个数，$\overline{A}$ 表示数据集中所有光斑图的均值图像，A_k 为第 k 个图像，$\overline{A}_i$ 则表示类 $\theta_i(\theta_i=1,2,\cdots,15)$ 的均值图像，N_i 为 θ_i 中光斑图的数量。J 的值越大表示类内方差越小而类间方差越大，光斑间的可分性越高。经计算后得到 FM-MCF 和 MMF 的 J 值分别为 106.56 和 46.82，这说明 FM-MCF 的光斑图样具有更好的可分性，从而能够实现更高的分类精度。从光纤自身的模式耦合角度分析，MMF 中有大量高阶模式为强耦合作用，其容易受到外界环境随机扰动的影响，从而导致输出光斑图发生随机变化。而相比之下，本文采用的 FM-MCF 的芯间为弱耦合，可以缓解一定程度的随机耦合作用，对小的环境扰动具有鲁棒性，所以同一类光斑间的差异远小于不同类间的，光斑分类精度更高。

另外，在对图像做差分处理时会间隔一段时间更新参考光斑图，因此测试了实验过程中系统自身的稳定性。零均值归一化互相关系数（ZNCC）是一种常用的图像相关算法，这里计算了相同时间间隔采集的未受扰动的 FM-MCF 和 MMF 光斑图的 ZNCC 值变化，如图 8 所示。从图中可以看出，MMF 光斑图的 ZNCC 值变化很大，即光斑图的去相关速度很快，这进一步说明了 MMF 易受外界随机扰动的影响。

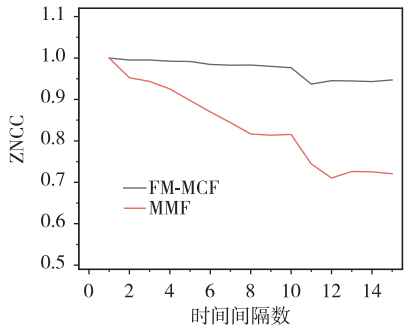


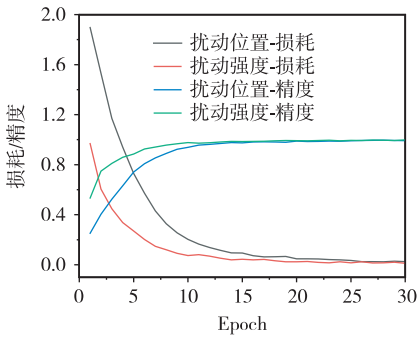
图 8　FM-MCF 和 MMF 光斑图的 ZNCC 值变化

最后，沿光纤任一点的变化都可能引起其输出光斑的改变，因此在理论上可实现沿光纤任一点的扰动定位。实验探测了该传感器用于更高空间分辨率扰动定位的可行性，受实验装置条件限制，可操作的最小扰动点间隔为 1 cm，因此采集了间距为 1 cm 的 3 个不同扰动位置下光纤输出的光斑图样。基于图 4 所示的 CNN 模型对数据集进行识别分类，得到分类准确率为 95%，这表明在 1 cm 的空间分辨率下该传感器仍具有一定的扰动定位能力。此结果说明基于 FM-MCF 的光斑检测相对于传统的 MMF 光纤在扰动定位传感方面具有明显优势，而

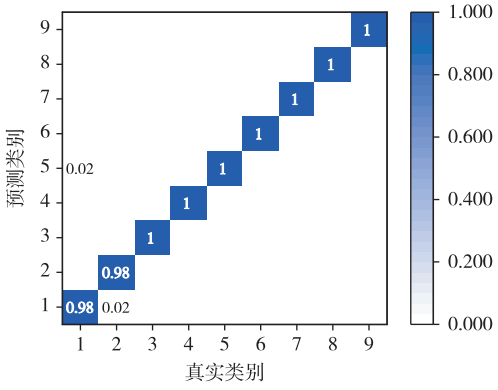
在之后的工作中可进一步通过优化实验装置等方式实现更高空间分辨率的高精度扰动定位传感。

3.3 扰动位置和强度分类实验

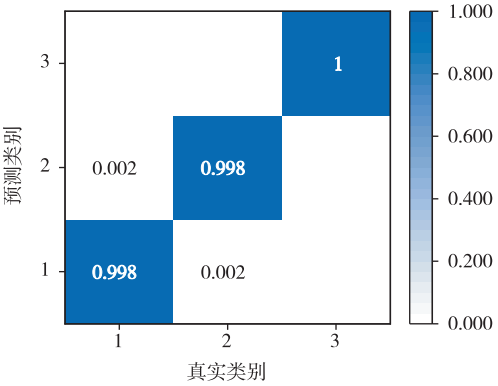
鉴于弱耦合多芯少模光纤结构的优点，也对传感器同时识别扰动位置和扰动强度的能力进行了验证。使用步进电机致动器在 FM-MCF 中间部分的 7 个不同点处施加了 3 种不同程度的扰动，其中扰动点位置被标记数字 1～7，扰动强度被标记数字 1～3。对于每个位置施加的每种程度的扰动，采集了 200 张光斑图样，总共采集了 4 200 张光斑图样，按 3∶1 的比例随机划分为训练集和测试集。从图 9(a)中可以看出，在现有网络深度的条件下，损耗和精度曲线很快达到了稳定状态。图 9(b)、(c)分别显示了扰动位置和扰动强度的分类精度，平均精度均为 99.81%，说明了传感器具有良好的扰动位置和扰动强度识别能力，可用于探测更多的光纤扰动多参量传感应用。



(a) 网络模型训练过程



(b) 扰动位置分类结果



(c) 扰动强度分类结果

图 9 扰动位置和强度分类实验结果

4 结论

本文提出了一种基于 FM-MCF 输出光斑图检测的光纤扰动传感器。首先使用步进电机致动器在 FM-MCF 上 15 个不同位置点处施加程度基本一致的扰动，通过 CNN 模型对相应光斑图进行了扰动位置分类处理，以 3 cm 的空间分辨率实现了 99.46%的高精度分类，远高于在相同条件下仅采用 MMF 的扰动位置分类结果。这得益于 FM-MCF 的芯间弱耦合-芯内强耦合特性，使得传感器在保持高灵敏度的同时也对小的环境扰动具有鲁棒性。之后，基于双输出层网络，验证了该传感器同时检测扰动位置和扰动强度的能力，对 FM-MCF 上的 7 个扰动位置和 3 种扰动强度的识别准确率均接近 100%。总的来说，基于 FM-MCF 的光纤扰动传感器结构简单、成本低、传感性能良好。另外，多输出层分类网络可以利用相关特征的协同作用，多个分类任务之间共享参数，实现同时探测更多的光纤扰动性质参量传感应用。

参考文献：

[1] Villatoro J, Arrizabalaga O, Durana G, et al. Accurate strain sensing based on super-mode interference in strongly coupled multi-core optical fibres[J]. Sci. Rep., 2017, 7: 4451.

[2] Arrizabalaga O, Sun Q, Lee T, et al. Multi-parameter optical gauge based on mode coupling effect in asymmetric index multi-core fibres[J]. Opt. Lasers Eng., 2022, 154: 107047.

[3] Hong X, Guo H, Xu K, et al. An intrusion detection sensor based on coherent optical time domain reflector[J]. Microwave Opt. Technol. Lett., 2010, 52(12): 2746-2748.

[4] Murray M, Davis A, Kirkendall C, et al. Speckle-based strain sensing in multimode fiber[J]. Opt. Express, 2019, 27(20): 28494-28506.

[5] 沙 洲. 长距离相位敏感光时域反射分布式扰动探测系统探究[D]. 天津：天津大学，2018.
Sha Zhou. Research on long haul distributed disturbance sensing system based on -OTDR [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.

[6] 史云飞. 基于双 Mach-Zehnder 干涉仪的扰动定位方法研究[D]. 威海：山东大学，2015.
Shi Yunfei. Methods of disturbance positioning based on dual

Mach-Zehnder interferometer [D]. Weihai: Shandong University, 2015.

[7] Hong X, Wu J, Zuo Ch, et al. Dual Michelson interferometers for distributed vibration detection[J]. Appl. Opt., 2011, 50(22): 4333-4338.

[8] Liu Y, Li G, Qin Q, et al. Bending recognition based on the analysis of fiber specklegrams using deep learning[J]. Opt. Laser Technol., 2020, 131: 106424.

[9] Razmyar S, Mostafavi M. Deep learning for estimating deflection direction of a multimode fiber from specklegram[J]. J. Lightwave Technol., 2021, 39(6): 1850-1857.

[10] Liu Y, Zou X, Li G, et al. An optical contact force sensor for tactile sensing based on specklegram detection from concatenated multimode fibers[J]. Opt. Laser Technol., 2021, 143: 107362.

[11] Fujiwara E, Paula F, Wu Y, et al. Optical fiber tactile sensor based on fiber specklegram analysis[J]. Proc. of SPIE, 2017, 10323: 1-4.

[12] Fujiwara E, Silva L, Cabral T, et al. Optical fiber specklegram chemical sensor based on a concatenated multimode fiber structure[J]. J. Lightwave Technol., 2019, 37(19): 5041-5047.

[13] Mu G, Liu Y, Qin Q, et al. Refractive index sensing based on the analysis of D-shaped multimode fiber specklegrams [J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2020, 32(8): 485-488.

[14] Cuevas A, Fontana M, Rodriguez-Cobo L, et al. Machine learning for turning optical fiber specklegram sensor into a spatially-resolved sensing system proof of concept[J]. J. Lightwave Technol., 2018, 36(17): 3733-3738.

[15] Wei M, Tang G, Liu J, et al. Neural network based perturbation-location fiber specklegram sensing system towards applications with limited number of training samples [J]. J. Lightwave Technol., 2021, 39(19): 6315-6326.

[16] Bender D, Cakir U, Yuce E. Deep learning-based fiber bending recognition for sensor applications[J]. IEEE Sens. J., 2023, 23(7): 6956-6962.

作者简介：

袁　晖(1998—)，女，硕士研究生，主要从事光纤传感方面的研究；

刘　艳(1978—)，女，博士，教授，主要从事光纤通信、光纤传感方面的研究。