图像处理在光纤光斑微位移传感中的应用

秦 齐[1,2],刘 艳[1,2],刘欢欢[3],时 川[1,2],谭中伟[1,2]

(1. 北京交通大学 全光网络与现代通信网教育部重点实验室,北京 100044;
2. 北京交通大学 光波技术研究所,北京 100044;
3. 国网信息通信产业集团研发中心,北京 102209)

摘 要:基于多模光纤的多模干涉原理以及图像处理算法,对多模光纤输出端面光斑图像相位谱的灰度共生矩阵特征值进行提取,提出一种新型光斑图样处理算法,并且将其应用于微位移传感。详细分析了以阶跃型多模光纤为基础的单模-多模光纤结构在两光纤径向产生微位移时,位移量与端面光斑图像相位谱特征值之间的关系。对多种结构参数光斑图样的分析表明,两光纤径向微位移与相关性及一致性两特征值成近似线性关系,可以用光斑图像处理的方法进行微位移测量,从而实现传感。实验结果表明与目前常用的计算光斑图像归一化强度内积处理算法相比,多模光纤芯径较小时,线性度、动态范围比较接近;芯径较大时,线性度提高的同时动态范围扩大约一倍。因此所提出的算法稳定性更好,适用范围更广。

关键词:光纤传感; 光纤光斑; 图像处理; 微位移

中图分类号:TN247 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201847.1022004

Application of image processing in micro-displacement sensing of fiber speckle

Qin Qi[1,2], Liu Yan[1,2], Liu Huanhuan[3], Shi Chuan[1,2], Tan Zhongwei[1,2]

(1. Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
3. State Grid Information & Telecommunication Group R & D Center, Beijing 102209, China)

Abstract: Based on the principle of multi-mode interference of multimode fiber and the algorithm of image processing, the characteristics of gray level co-occurrence matrix of phase spectrum of multi-mode fiber output speckle pattern were extracted, a new speckle pattern processing algorithm was proposed and applied to micro-displacement sensing. The relationship between the displacement and the characteristics of the phase spectrum of the output speckle pattern was analyzed in detail, when the single-mode-multimode fiber structure based on step-index multimode fiber generated micro-displacement in the radial direction of the two optical fibers. The analysis of speckle patterns of various structural parameters shows

收稿日期:2018-05-10; **修订日期**:2018-06-20

基金项目:中央高校基本科研业务费项目(2016JBM002)

作者简介:秦齐(1994-),男,硕士生,主要从事光纤传感方面的研究。Email: qqin0110@163.com

导师简介:刘艳(1978-),女,副教授,博士,主要从事光纤通信、光纤传感方面的研究。Email: bjtuly@163.com

that, the approximation linear relationship between radial micro-displacement of the two optical fibers and the two characteristics including correlation and homogeneity can be obtained. Therefore, in order to achieve micro-displacement measurement, the method of image processing algorithm over speckle pattern can be used, making further efforts to realize optical fiber sensing. The experimental results show that compared with the commonly used algorithm of calculating normalized intensity inner product of the speckle pattern, when the core diameter of multi-mode fiber is small, the linearity and dynamic range are relatively close, when the core diameter is larger, the dynamic range is doubled while the linearity is improved. Therefore, the proposed algorithm has better stability and wider application range.

Key words: optical fiber sensing; fiber speckle; image processing; micro-displacement

0 引 言

相干光在多模光纤内部传输时，由于传输模式之间相互干涉，在光纤输出端面会出现明暗相间的斑点,这些斑点的集合称为光斑图样。光斑图样携带了大量的光纤空间状态信息，利用输出光斑图样可得到光纤的受干扰信息及其受干扰程度，因此可应用于光纤传感领域，称为光纤光斑传感器 (Fiber-Optic Specklegram Sensors, FSSs)[1]。由于结构简单、成本低、抗电磁干扰等优点,光纤光斑传感器已经被广泛应用于温度、应变、生命体征等参数的测量。

目前,除了对传感器应用的拓展,光纤光斑传感器的研究还主要集中在光斑图样处理方法上。对光斑图样处理的算法中主要包括，基于差分的图像处理算法,基于光斑检测的处理方法等。采用基于差分的图像处理算法,Lomer 等人成功测量了动脉脉搏的变化[2];采用基于光斑检测的处理方法,贺锋涛等人通过对对比度进行分析，实现了多模光纤应力测量[3]。但是基于差分的处理算法不适用于待测参量剧烈变化的情况，而基于光斑检测的处理算法灵敏度有待提高,因此,最常用的是第三类处理方法也就是基于光纤光斑图样相似度关系的归一化强度内积处理算法 (Normalized Inner-Product Coefficient, NIPC)。

使用NIPC 图样处理算法,2015 年,Rohollahnejad 等人对光纤所受外部应力变化进行了测量[4];2016年,参考文献[5]设计出一种基于多模光纤的触控面板,可将其应用于人机交互;2017 年,参考文献[6]实现了二维平面上压力值的分布测量。此外,还有学者对 NIPC 算法进行改进。通过变换参考光斑图样可以得到分段线性的 NIPC 输出曲线，从而扩大了微位移传感器的动态范围，但该方法需不断地更改参考光斑图样,额外的光斑图样校准比较复杂[7];通过将得到的光斑图样进行区域分割，然后在各个区域分别计算 NIPC 值，从另一个角度增大了光纤光斑微位移传感器的动态范围，但该方法在选取分割区域的位置和大小上，需通过大量计算寻找最优分割数量和最优分割区域[8]。

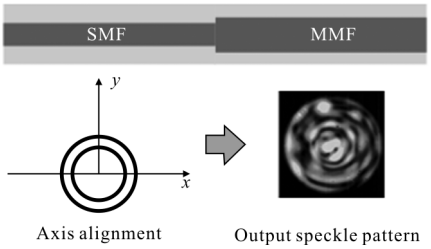
不同于 NIPC 的处理方法，从多模光纤光斑图像展现出的纹理特性出发，提出一种新型的基于二维傅里叶变换(Two-Dimension Fourier Transform)和灰度共生矩阵的光纤光斑图样处理算法，并将该处理方法应用于光纤微位移传感。这种算法只需利用单个输出光斑图样进行处理,不需额外校准;且由于算法考虑光斑图样整体纹理，因此不需要通过大量计算寻找最优分割个数和最优分割区域。与常用的 NIPC 算法相比,适用范围更广;与改进的 NIPC 算法相比,复杂度有所降低。

1 传感原理及光斑图像处理方法

1.1 传感原理

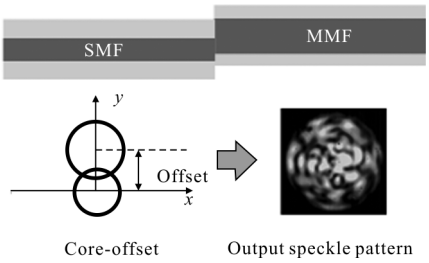
单模光纤与多模光纤轴心对准方式对接时,由于输入场圆对称的性质以及 SMF-SIMMF 轴心对准的方式,SIMMF 中激发出的传导模式数量很少,只存在圆对称模式 LP_{0m}[9]。如果使单模光纤与多模光纤的轴心产生偏移，场的中心激发性质将遭到破坏,从而可以在 MMF 中激发出大量高阶模式,大量高阶模式之间的干涉导致多模光纤的输出光斑图样

发生极大变化,并呈现出复杂的纹理特性[10]。将单模光纤与多模光纤进行轴心对接方式和轴心偏移对接方式分别如图 1(a)、(b)所示,图中还一并给出了相应情况下,多模光纤输出的典型光斑。



(a) 光纤轴心对接

(a) Fiber axis alignment



(b) 光纤偏芯对接

(b) Fiber core-offset alignment

图 1 单模光纤与多模光纤对接示意图

Fig.1 Docking diagram of SMF and MMF

根据多模干涉理论,光纤输出端光强表达式为:

$$I_0(x,y)=\left|A_0(x,y)\right|^2=\sum_m^M\sum_n^N a_{0m}(x,y)a_{0n}(x,y)\exp\left[j(\phi_{0m}-\phi_{0n})\right] \quad (1)$$

式中:$A_0(x,y)$为多模光纤输出端面光斑分布;M 和 N分别为多模光纤内传输的模式数量;$a_{0m}(x,y)$和 $\phi_{0m}(x,y)$、$a_{0n}(x,y)$和 $\phi_{0n}(x,y)$分别为第 m 和第 n 个模式的幅度和相位,可以得到输出端面光斑图样由激励条件(单模光纤到多模光纤的耦合) 和多模光纤中众多模式间的相位差决定[11]。偏移值越大激发模式数量越多,叠加效果越复杂,输出光斑图样更加随机,纹理特性更加明显。

1.2 光斑图像处理方法

纹理特征是随机图像的一个重要特征, 是对图像各个像元之间空间分布的一种描述, 与其他图像特征相比, 它能更好地兼顾图像的宏观性质和微观结构两方面, 因此纹理是图像目标识别需要提取的重要特征。

在图像处理过程中, 图像频率可以表征图像灰度变化的剧烈程度,目前,常用的图像频率变换方法为二维傅里叶变换 (Two-Dimension Fourier Transform)。二维傅里叶变换可以得到包含图像纹理结构特性的相位谱和包含图像对比度及亮度信息的幅度谱[12]。对于大部分图像而言,幅度谱都比较相似,但不同图像的相位谱差异很大。相位谱包含信号各频率成分的相互位置关系, 保存了图像的重要纹理特征信息。因此基于图像的相位谱进行纹理特征提取。

灰度共生矩阵 (Gray-Level Co-occurrence Matrix,GLCM)是提取图像纹理特征的常用有效方法, 可以从灰度共生矩阵中提取描述图像纹理的统计量, 如同质性 (Homogeneity, HOM) 和相关性 (Correlation, COR) [13]。其中同质性 HOM 的定义如公式(2)所示:

$$HOM=\sum_i^L\sum_j^L p(i,j)/(1+|i-j|) \quad (2)$$

式中:L 为灰度共生矩阵的行列数; $p(i,j)$为第 i 行,第 j 列的共生矩阵元素值。同质性表示灰度共生矩阵内部元素分布与对角线的紧密程度, 反应图像局部纹理的变化,如果不同区域间变化小,该值越大,表明局部非常均匀。

相关性(Correlation, COR)的定义如公式(3)所示:

$$COR=\sum_{i=1}^L\sum_{j=1}^L (i-\mu_x)(j-\mu_y)p(i,j)/\sigma_x\sigma_y \quad (3)$$

式中:L 为灰度共生矩阵的行列数;$p(i,j)$为第 i 行,第 j 列的共生矩阵元素值;μ_x,μ_y,σ_x,σ_y分别是灰度共生矩阵行列方向上的均值和方差。相关性值大小反映了图像中局部灰度相关性。如果矩阵局部元素变化很大,则相关值就小,表明局部越不均匀。

基于以上理论, 将与单模光纤偏芯对接后多模光纤输出光斑转换为灰度图像,然后进行降噪处理,接着进行二维傅里叶变换,得到幅度谱和相位谱,在相位谱的基础上求取参数 COR 和 HOM 值,具体处理流程图如图 2 所示。

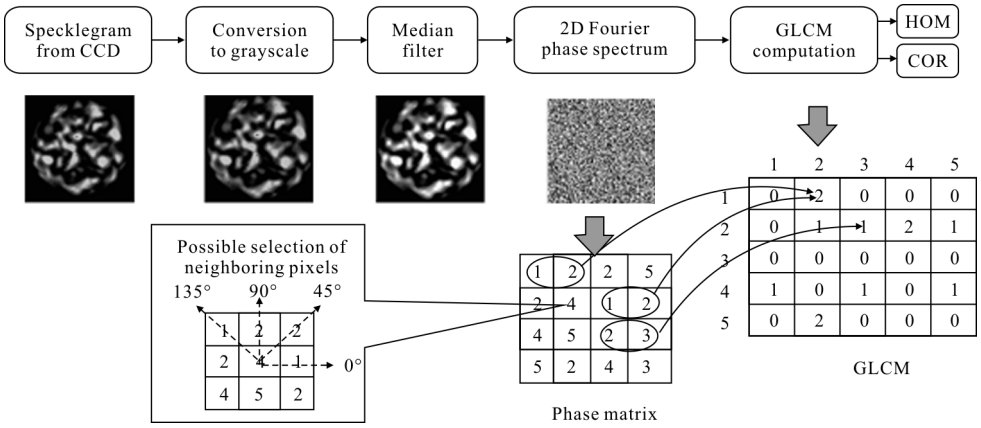


图 2 光斑图样处理流程图

Fig.2 Flowchart of speckle pattern processing

2 实验及结果分析

实验装置如图 3 所示，可调谐半导体激光器(Agilent 8164A) 输出光束从 SMF 偏芯入射至 SIMMF，在多模光纤输出端使用近红外相机(Xenics Xeva TE_1)得到光斑图样。实验中保持光源功率为−13 dBm，采用四组具有不同芯径和长度的 SIMMF(实验参数如表 1 所示),分别改变其与单模光纤的纤芯偏移值,得到四组光斑图样。

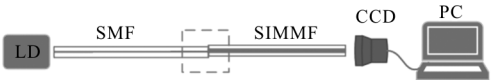


图 3 实验装置图

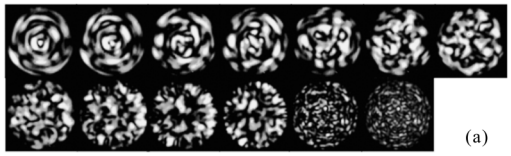
Fig.3 Experimental setup

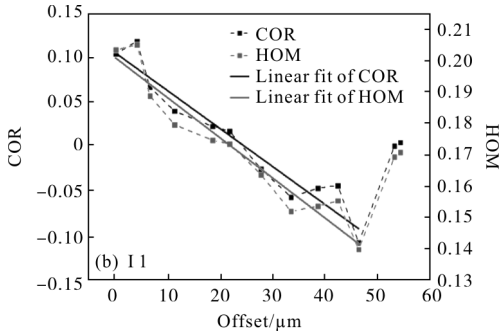
表 1 四组实验参数及光斑参数线性拟合值(R^2)

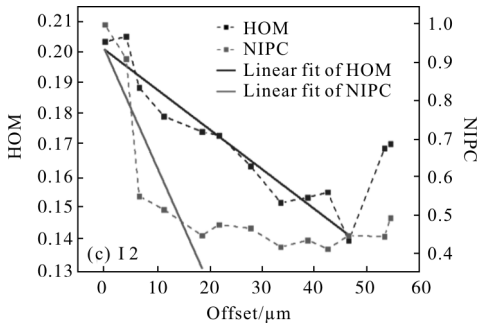
Tab.1 Experimental parameters and the linear fit R^2 in the four sets of experiments

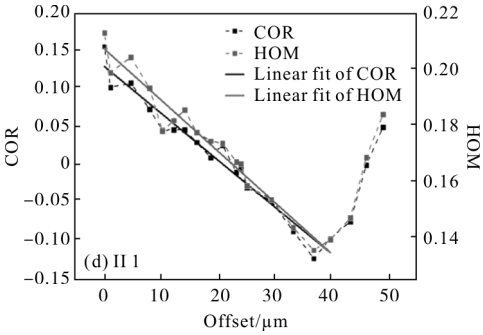
Group	D/μm	L/cm	R^2		
			COR	HOM	NIPC
Ⅰ	105	45	0.927 1	0.929 8	0.684 1
Ⅱ	105	100	0.956 2	0.955 0	0.882 1
Ⅲ	50	100	0.934 6	0.946 7	0.951 0
Ⅳ	62.5	100	0.939 9	0.965 6	0.977 3

由于前两组实验与后两组实验分别呈现出比较接近的性质，因此第一组和第二组实验结果示于图4，第三组和第四组实验结果示于图 5。为便于对比观









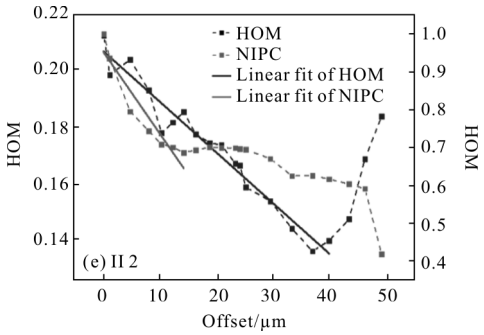


图 4 (a) 第一组实验光斑变化图样; (b)、(c)、(d)、(e)分别为第一组和第二组实验 COR 和 HOM, HOM 和 NIPC 随纤芯偏移值的变化及线性拟合

Fig.4 (a) Output speckle pattern of group Ⅰ; (b), (c), (d), (e) Variation of COR and HOM, HOM and NIPC with the core offset and linear fitting of group Ⅰ and Ⅱ

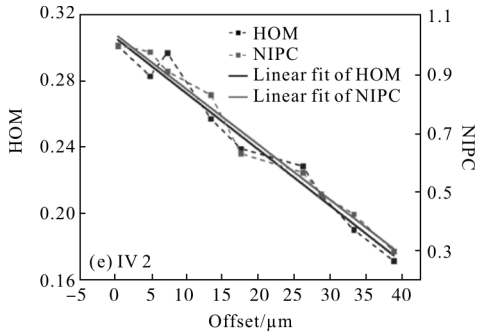
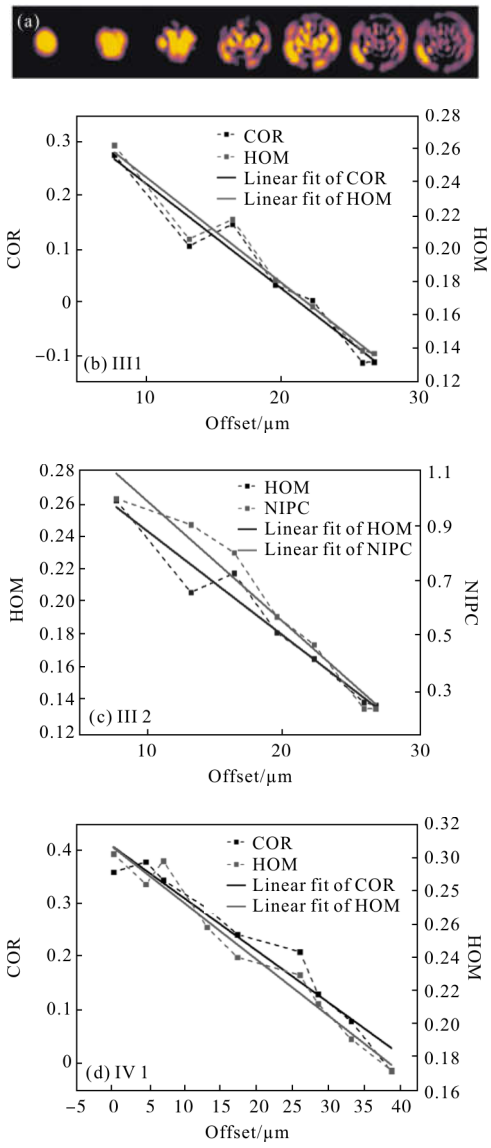


图 5 (a) 第三组实验光斑变化图样; (b)、(c)、(d)、(e)分别为第三组和第四组实验 COR 和 HOM, HOM 和 NIPC 随纤芯偏移值的变化及线性拟合

Fig.5 (a) Output speckle pattern of group Ⅲ; (b), (c), (d), (e) Variation of COR and HOM, HOM and NIPC with the core offset and linear fitting of group Ⅲ and Ⅳ



察，每次实验将 COR 和 HOM 以及 HOM 和 NIPC 分别绘制在两幅图上，利用三种参数进行线性拟合的拟合优度(R^2)如表 1 所示。

整体上看，所提出的两个参数，由于考虑单个图像的纹理特征，因此在四组实验动态范围内均具有良好的线性效果，并且比较稳定。采用不同芯径光纤时，随着偏移量的增加，芯径越大的光纤中激发出的模式数越多，引起光斑的变化越剧烈，而 NIPC 的方法依赖于与参考光斑的相关计算，因此在相同偏移量时，芯径越大的光纤光斑对应参考光斑变化越大，从而使 NIPC 的动态范围减小，正如第一二组采用 105 μm 芯径的光纤实验与第三四组采用 50 μm 及 62.5 μm 芯径的光纤的实验结果对比所示。

在前两组实验中，参数 COR 和 HOM 随着两纤芯偏移量的增加而减小，说明模间干涉导致输出光斑图样局部纹理变化越来越大。随着纤芯的偏移，入射至 MMF 内的光强逐渐减少，输出光斑暗色区域越来越多，因此当偏移量增大到一定程度后，两参数达到一个最小值，意味着此时输出光斑区域亮暗分布达到一个比较均匀的水平，此后继续增加位移量，暗色区域主导作用越来越明显，导致参数值呈现上升的趋势。对于 NIPC 参数而言，所受光纤结构参数的影响较大，第一组实验中，随着位移量的增加，激发模式发生明显变化，导致 NIPC 值急剧下降，也就是说，芯径 105 μm 时，位移量的微小改变也会导致输出光斑图样的巨大变化，第二组实验中，改变实验

光纤参数后,NIPC 呈现下降趋势,但是在动态范围内的拟合效果仍然不如所提出的两个参数。

与前两组不同的是后两组两次实验中当 SMF 与 SIMMF 轴心对准时,光斑非常小,接近于单模入射情况,输出端呈现出一个亮斑图样。随着偏移量的增加,光斑开始逐渐扩大,逐步显现出纹理特征,并且光斑中的亮斑数目显著增加, 但光斑纹理比较相似,因此,COR 和 HOM 两个参数呈下降趋势;对于 NIPC 而言,由于使用两幅图像之间的相关关系,并且参考图像为纤芯对准的情况, 因此在实际计算 NIPC 参数时, 公式实际上只考虑了靠近纤芯部分的能量变化,根据 2.1 的理论部分和实验图像可得,纤芯部分能量是逐渐减少的, 因此两组 NIPC 值均呈现下降趋势,且线性拟合度比较好。

相比于第一组实验结果, 第二组实验结果动态范围更窄,是由于增大光纤长度,损耗增加,在光源功率不变的情况下, 输出光斑更早进入暗色区域主导阶段。后两组实验中,采用芯径更小的 MMF,一方面由于光场能量更为集中, 使偏芯引起的损耗减小,另一方面由于芯径为 50 μm 的 MMF 中激发出的模式数量要远远小于 105 μm 情况, 因此采用 50 μm 芯径获得的动态范围最小。

值得注意的是实验中使用 Agilent 公司的半导体可调谐激光器, 线宽约为 100 kHz, 相干性比较好, 保证多模光纤中激发出的多个模式产生很好的干涉效果,输出光斑纹理特性明显。实验中改变多模光纤芯径、长度、摆放位置,得到的数据结果表明,不同参数下动态范围略有变化, 但整体趋势保持一致,即改变参数后基本性能保持不变。此外,外界的轻微扰动会改变光斑图样中亮斑的具体位置, 但光斑纹理特性变化不大, 因此利用光斑纹理特性的分析方法具有比较好的适应性。

3 结 论

提出了一种新型的光纤光斑传感器处理算法,即对 MMF 输出端光斑图样进行二维傅里叶变换得到相位谱,然后对相位谱进行纹理分析,求取灰度共生矩阵 COR 和 HOM 参数值,并将该算法引入对多模光纤偏芯对接的微位移测量实验中。改变多模光纤的芯径和长度进行实验,实验结果表明,与目前广泛使用的基于图像之间相关性的 NIPC 处理算法相比,所提出的算法在保证线性度的同时,对光纤结构参数不敏感,适用范围更广,并且在一定程度上扩大了动态范围, 可应用于因模间干涉而导致输出端光斑图样纹理特性发生变化的光纤光斑传感器中,因此在光纤光斑传感领域具有良好的应用前景。进一步的研究方向是进一步降低方法的复杂度, 并将该图像分析方法应用于光纤偏芯对接所激励出的模式分析之中。

参考文献:

[1] Efendioglu H S. A Review of fiber-optic modal modulated sensors: specklegram and modal power distribution sensing [J]. ***IEEE Sensors Journal***, 2017, 17(7): 2055-2064.

[2] Lomer M, Rodríguez-Cobo L, Revilla P, et al. Speckle POF sensor for detecting vital signs of patients [C]//SPIE, 2014, 9157: 91572I.

[3] He Fengtao, Cao Jinfeng, Wang Xiaolin, et al. Stress sensing system based on laser speckle [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44(12): 3729-3733. (in Chinese)

[4] Rohollahnejad J, Xia L, Ran Y, et al. Deformation independent FBG strain sensor based on speckle pattern processing [C]//IEEE Optical Communications and Networks, 2015: 1-3.

[5] Fujiwara E, Paula F D, Wu Y T, et al. Optical fiber tactile sensor for user interfaces [C]//IEEE International Symposium on Consumer Electronics, 2016: 11-12.

[6] Fujiwara E, Wu Y T, Marques dos Santos M F, et al. Development of a tactile sensor based on optical fiber specklegram analysis and sensor data fusion technique [J]. ***Sensors and Actuators: A. Physical***, 2017, 263: 677-686.

[7] Francis T S, Wen M, Yin S, et al. Submicrometer displacement sensing using inner-product multimode fiber speckle fields [J]. ***Applied Optics***, 1993, 32(25): 4685-4689.

[8] Fujiwara E, dos Santos M F M, Suzuki C K. Optical fiber specklegram sensor analysis by speckle pattern division [J]. ***Applied Optics***, 2017, 56(6): 1585-1590.

[9] Li Ying, Tan Zhongwei, Sun Jian, et al. Selective mode excitation of step-index multimode fiber [J]. ***Electro-Optic Technology Application***, 2016, 31(1): 11-15. (in Chinese)

[10] Liu Huanhuan. Study on mode analysis and spectrum

Analysis Based on Multimode Fiber Specklegram Detection [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)

[11] Li Qiang, Huang Zejia, Xu Yaqin, et al. Optical fiber sensing system based on multimode interference of single-mode-multimode-single-mode fiber structure [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43(5): 1630-1636. (in Chinese)

[12] Dong Mingli, Li Bo, Zhang Fan, et al. Detection of periodic microstructure defect based on optical Fourier transform [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2017, 25(7): 1727-1737. (in Chinese)

[13] Chen Yanqin, Duan Jin, Zhu Yong, et al. Research on the image complexity based on texture features [J]. ***Chinese Optics***, 2015, 8(3): 407-414. (in Chinese)