

## 基于激光散斑的应力传感系统

贺锋涛,曹金凤,王晓琳,朱玉晗,左波,王静

(西安邮电大学 电子工程学院,陕西 西安 710061)

**摘要:** 激光散斑传感技术具有结构简单、灵敏度高等特点,可以实现对应力、振动、距离、速度、流速等物理量的传感测量,已成为光学传感领域中的研究热点之一。设计了一套基于激光散斑的应力传感系统。该系统使用波长为 405 nm 激光作为光源,利用音圈电机振动多模光纤,同时采用 CCD 图像传感采集系统对抛光玻璃表面进行显微成像,通过 MATLAB 软件对采集到的散斑图像进行分析处理,计算散斑对比度,拟合散斑对比度随时间变化的曲线。结果表明:散斑图像对比度的变化反应了多模光纤应力的变化,通过多模光纤应力变化可以判断是否有入侵者,实现了防盗功能。

**关键词:** 激光散斑; 应力传感; 显微成像; 散斑对比度; 防盗

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3729-05

## Stress sensing system based on laser speckle

He Fengtao, Cao Jinfeng, Wang Xiaolin, Zhu Yuhan, Zuo Bo, Wang Jing

(College of Electronic Engineering, Xi'an University of Post and Telecommunications, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** The sensing technology based on laser speckle has become one of research hotspots in the field of optical sensing to measure the stress, vibration, distance, speed and flow rate, owing to its significant advantages in simplicity and high precision. A set of stress sensing system based on laser speckle was designed in this paper. The wavelength of 405 nm laser was used as the light source in the system. The voice coil motor was used to vibrate multimode fiber, and CCD image sensor acquisition system was applied to image for polishing glass surface. MATLAB software was used to analyze the collected speckle images, calculating the contrast, fitting the curve of the speckle contrast. The results show that speckle contrast changes reflect the stress variation in the multimode fiber. Through the multimode fiber stress changes can be judged whether there is an intruder, anti-theft function is realized.

**Key words:** laser speckle; stress sensing; micro-imaging; speckle contrast; anti-theft

收稿日期:2015-04-07; 修订日期:2015-05-08

基金项目:国家自然科学基金(61201193)

作者简介:贺锋涛(1974-),男,副教授,博士,主要从事光电传感信息处理技术、信息高密度光存储等方面的研究。

Email: hefengtao@xupt.edu.cn

通讯作者:曹金凤(1989-),女,硕士生,主要从事激光成像方面的研究。Email: xucjf2008@126.com

## 0 引言

散斑在全息术<sup>[1]</sup>和图像处理<sup>[2]</sup>中十分有害,它影响了成像系统的分辨率<sup>[3]</sup>,隐藏了图像的细节信息<sup>[4]</sup>,因此人们最初主要研究如何减弱散斑的影响,然而在研究的过程中发现了散斑携带了光束和光束所通过时反射的物体的信息<sup>[5]</sup>。若处在激光散射场中的散射体发生变化,比如散射体受到的外界应力变化时,通过获取变换前后的散斑光强分布,就可以测出引起散射体变化的外界应力。散斑这一特征的发现引发了基于激光散斑的应力、振动、距离、速度、流速等物理量的传感测量<sup>[6-7]</sup>。

文中设计了一套基于激光散斑的应力传感系统,通过音圈电机振动多模光纤使光纤受到外界应力的作用,这将引起光纤中相位的变化,最终引起散斑图像的变化,从而实现对应力变化的传感,最终判断出有无入侵者,达到防盗功能。该系统成本低、精度高、结构简单且实用可行。

## 1 系统结构及原理

当光纤受到外界应力即微弯扰动的时候,会使得光纤中相位有所变化,从而导致传输光强变化<sup>[8]</sup>,将光纤传感技术<sup>[9]</sup>应用于防盗,结合激光散斑成像技术<sup>[10]</sup>,通过音圈电机振动多模光纤实现外界应力对光纤的微弯调制,观察散斑的变化,便可实现应力传感,最终判断出有无入侵者,以达到防盗功能。基于这个思想搭建了激光散斑应力传感系统,如图 1 所示。

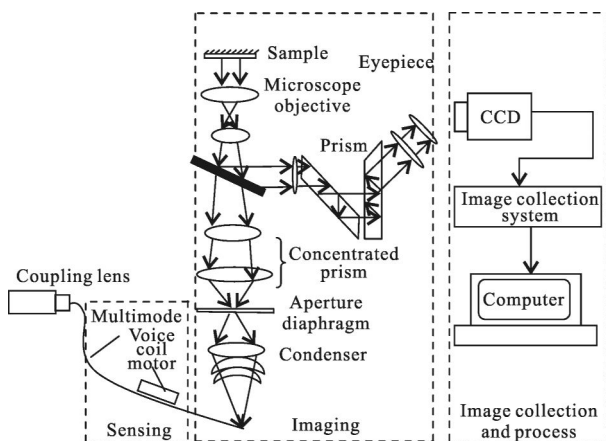


图 1 传感系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of sensing system

该系统有 3 个模块,分别是传感、成像和图像采集处理部分。其基本原理为:从激光器中输出的激光通过振动的光纤传输到聚光镜上,汇聚的激光光束进入孔径光阑,通过该光阑会聚的光束由聚光棱镜会聚,经过分束器将光束分为两个方向,其中一个方向的光束由辅助物镜变为平行光打在了测量样品上,经过样品的反射(其反射光中带有大量的样品信息),分光镜改变光路,最终经过棱镜呈倒立放大的实像,这个过程中所出射的光束最后通过目镜接收,出射后呈放大的像,由 CCD 摄像头拍照采集,显示器上成像后,最终显示于计算机中,存储后利用 MATLAB 软件,计算出采集到的散斑图像的对比值。

该系统选用光源为 0.5 W、532 nm 的激光<sup>[11]</sup>, CCD 摄像头像素为 786×576,光纤为多模光纤<sup>[12]</sup>,显微镜物镜为 40 倍,数值孔径为 0.65。光学显微镜的分辨率由显微物镜的分辨率、CCD 摄像头的分辨率和图像采集卡的分辨率决定,但主要决定于显微物镜的分辨率<sup>[13]</sup>。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 传感系统调试

为了调试系统,选择系统在稳态下(即无振动)和非稳态下(不定频率的振动)采集的抛光玻璃表面激光散斑图像各 500 幅,其中第 1、320、500 幅如图 2 所示。

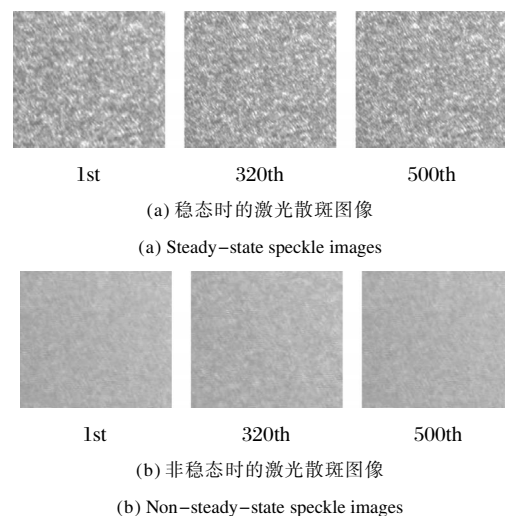


图 2 稳态和非稳态激光散斑图像

Fig. 2 Speckle images of steady-state and non-steady-state

一般评价激光散斑的标准选用对比值。利用公

式  $C = \sqrt{\frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle}}$  (式中,  $\langle \dots \rangle$  表示系统平均,  $I$  为散斑图上某一点处的光强值)<sup>[4]</sup>, 通过 MATLAB 软件来计算对比度。

从图 2(a)、(b)可以很明显地发现, 每幅图像的散斑分布以及颗粒度大小都是有区别的, 它们是动态变化的, 通过 MATLAB 仿真软件对这两种类型的图进行对比处理得到了散斑对比度曲线, 如图 3 所示。

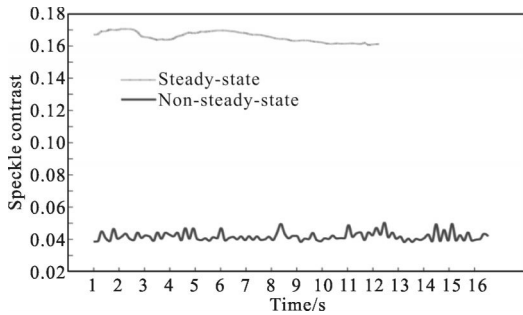


图 3 稳态和非稳态的散斑对比度曲线

Fig.3 Speckle contrast curve of steady-state and non-steady-state

由图 3 可知, 在稳态时, 500 幅散斑图像处于动态平衡, 其散斑对比度很大, 平均在 17.24% 附近波动, 图像的光强分布不均匀; 非稳态时, 散斑对比度变小, 平均在 4.32% 附近波动。稳态和非稳态的变化说明该传感系统可以检测应力。

### 2.2 传感系统对频率的检测

采集音圈电机振动电压频率在 5 Hz 时的抛光玻璃表面激光散斑图像 100 幅(图 4 分别示出其中第 1、2、50、51、99、100 幅图像), 计算其对比度, 如表 1 所示。由表 1 可以作出对比度曲线图, 如图 5 所示。

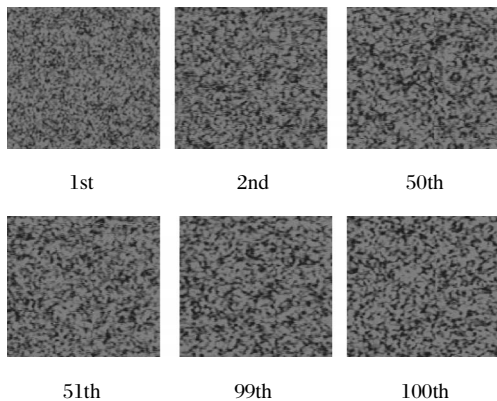


图 4 振动频率为 5 Hz 时, 抛光玻璃表面的激光散斑图像  
Fig.4 Speckle images of polishing glass surface when vibration frequency is 5 Hz

表 1 振动频率为 5 Hz 时, 100 幅图像的散斑对比度

Tab.1 Speckle contrast of 100 image when vibration frequency is 5 Hz

| No. | Speckle contrast | No. | Speckle contrast | No. | Speckle contrast |
|-----|------------------|-----|------------------|-----|------------------|
| 1   | 26.65%           | 35  | 27.06%           | 69  | 26.50%           |
| 2   | 27.08%           | 36  | 26.52%           | 70  | 26.65%           |
| 3   | 26.56%           | 37  | 26.65%           | 71  | 27.06%           |
| 4   | 26.65%           | 38  | 27.08%           | 72  | 26.52%           |
| 5   | 27.06%           | 39  | 26.59%           | 73  | 26.65%           |
| 6   | 26.52%           | 40  | 26.68%           | 74  | 27.08%           |
| 7   | 27.00%           | 41  | 27.06%           | 75  | 26.57%           |
| 8   | 27.34%           | 42  | 26.52%           | 76  | 26.65%           |
| 9   | 26.98%           | 43  | 27.00%           | 77  | 27.06%           |
| 10  | 26.70%           | 44  | 27.34%           | 78  | 26.52%           |
| 11  | 27.34%           | 45  | 26.98%           | 79  | 27.00%           |
| 12  | 27.01%           | 46  | 26.70%           | 80  | 27.34%           |
| 13  | 26.96%           | 47  | 27.34%           | 81  | 26.98%           |
| 14  | 27.30%           | 48  | 27.01%           | 82  | 26.70%           |
| 15  | 27.15%           | 49  | 26.96%           | 83  | 27.34%           |
| 16  | 26.77%           | 50  | 27.35%           | 84  | 27.01%           |
| 17  | 27.20%           | 51  | 27.15%           | 85  | 26.96%           |
| 18  | 26.58%           | 52  | 26.77%           | 86  | 27.35%           |
| 19  | 26.67%           | 53  | 27.20%           | 87  | 27.15%           |
| 20  | 27.18%           | 54  | 26.58%           | 88  | 26.77%           |
| 21  | 26.65%           | 55  | 26.67%           | 89  | 27.20%           |
| 22  | 27.00%           | 56  | 27.18%           | 90  | 26.58%           |
| 23  | 27.25%           | 57  | 26.65%           | 91  | 26.67%           |
| 24  | 26.98%           | 58  | 27.00%           | 92  | 27.18%           |
| 25  | 26.72%           | 59  | 27.25%           | 93  | 26.65%           |
| 26  | 27.34%           | 60  | 26.98%           | 94  | 27.00%           |
| 27  | 26.98%           | 61  | 26.83%           | 95  | 27.25%           |
| 28  | 26.75%           | 62  | 27.45%           | 96  | 26.98%           |
| 29  | 27.11%           | 63  | 26.98%           | 97  | 26.72%           |
| 30  | 26.93%           | 64  | 26.75%           | 98  | 27.34%           |
| 31  | 26.56%           | 65  | 27.11%           | 99  | 26.98%           |
| 32  | 27.08%           | 66  | 27.02%           | 100 | 26.75%           |
| 33  | 26.58%           | 67  | 26.66%           |     |                  |
| 34  | 26.64%           | 68  | 27.08%           |     |                  |

采集 100 幅图像所用时间为 6.9 s, 则 1 s 大约可以采集到 15 幅图像。由于提供给音圈电机的是振动频率为 5 Hz 的正弦波信号, 那么一个周期为 0.2 s, 计算得到一个周期中有 3 幅图像。

观察图 5, 在允许的误差范围内, 1 s 中基本符合 5 个周期; 并且图 5 的波形与提供给音圈电机的正弦波信号波形基本吻合, 即随着时间的增加, 图像散斑对比度呈现周期变化, 并且周期大约为 0.2 s, 而信号源所加的信号频率为 5 Hz, 利用频率和时间成反比的关系, 即周期为 0.2 s, 说明该信号就是检测到的信号, 成功实现了对信号频率的检测。

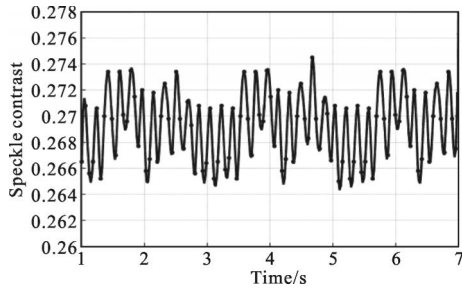


图 5 振动频率为 5 Hz 时,散斑对比度曲线

Fig.5 Speckle contrast curve when vibration frequency is 5 Hz

### 3 应用

为了实现防盗,用手振动光纤来模拟人走路时的频率。图 6 是采集到的 100 幅散斑图像中的第 1、2、6、7、11、12、16、99、100 幅图像,采集所用时间为 5.599 s,从中可以看出散斑图像呈周期性变化。计算

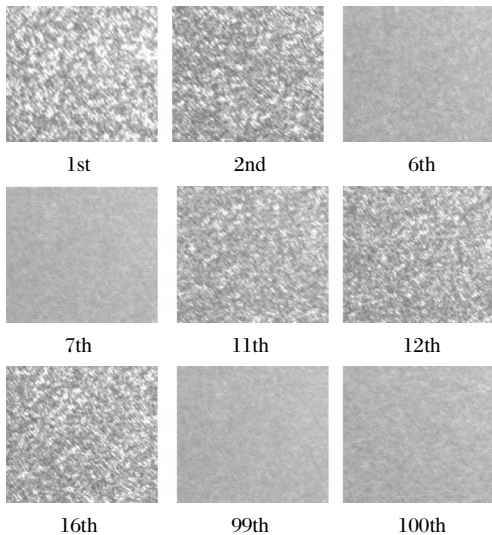


图 6 模拟走路的激光散斑图像

Fig.6 Speckle images of simulation walking

振动所采集到的 100 幅激光散斑图像的对比度,通过 MATLAB 软件作出散斑对比度随时间变化的曲线,如图 7 所示。

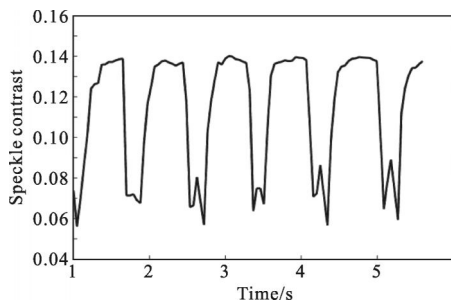


图 7 模拟走路的散斑对比度曲线

Fig.7 Speckle contrast curve of simulation walking

为了验证该系统的实用性,也模拟了人跑步时的频率,将所采集的散斑图像对比度进行分析,如图 8 所示。

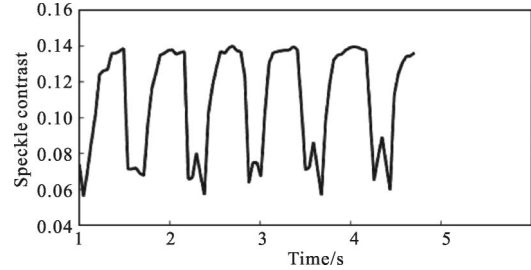


图 8 模拟跑步的散斑对比度曲线

Fig.8 Speckle contrast curve of simulation walking

从图 7 可以看出,振动光纤模拟人的走路频率时,采集的散斑图像对比度随时间有周期性的变化,在误差范围内,其周期为 0.85 s,可以得出振动频率为 1.18 Hz,这符合人一般走路时的频率。同理,从图 8 可以看出,振动光纤模拟人的跑步时,其周期为 0.67 s,得出振动频率为 1.5 Hz,符合人的跑步频率。

因此将这种方法应用到防盗中,将未振动光纤和振动光纤(模拟走路和模拟跑步)时采集到的散斑图进行对比度曲线拟合,如图 9 所示。

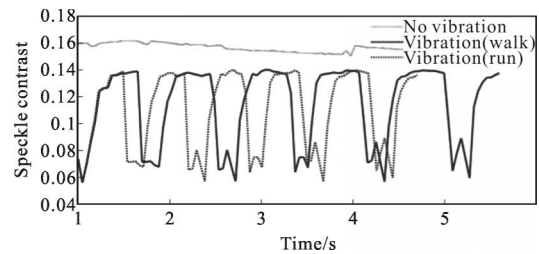


图 9 光纤未振动和振动下的激光散斑对比度曲线

Fig.9 Speckle contrast curve of the fiber with or without vibrating

从图 9 可以看到,未振动时,散斑图像对比度很大,是一条相对平滑的线条,可以认为此时没有入侵者,当用手振动光纤,分别模拟人走路和跑步的频率时,散斑对比度随时间发生变化,即外界应力变化反应在散斑图像对比度的变化上,根据这个关系,在地毯中嵌入光纤,做一个基于激光散斑的光纤传感系统,当有人入侵时,在终端会有一些的变化,通过散斑图像的变化,可以粗略地判断是否有人入侵者进入,也可以实现对频率的检测。

### 4 结论

文中采用激光作为光源的显微成像系统,通过

对所形成的激光散斑图像进行大量的分析,提出了一种将激光散斑和传感技术综合为一体的方法,即利用外界应力振动多模光纤,结合激光散斑的变化,来实现防盗功能。这种方法可以应用到生活中,将光纤分布在地毯上,有人侵入,通过踩踏地毯,使得光纤中的相位发生变化,在接收端激光散斑对应着发生变化,从而判断入侵者,实现防盗。通过 CCD 摄像系统及数据采集卡将显微图像采集、存储到计算机中,并用编译好的程序实现对显微图像的处理、分析。通过 MATLAB 对采集到的显微图像进行对比分析,从理论和实验出发,模拟人走路和跑步时的激光散斑对比度随时间的变化曲线,通过将激光散斑和光纤传感技术相结合,验证了其可行性,系统装置简单、成本低,对于防盗起着重要的作用。

#### 参考文献:

- [1] Maycock J, Hennelly B M, McDonald J B, et al. Reduction of speckle in digital holography by discrete fourier filtering [J]. *Journal of the Optical Society of America A-optics Image Science and Vision*, 2007, 24(6): 1617-1622.
- [2] Zhou Wang, Bovik A C. A universal image quality index[J]. *IEEE Trans Acoust, Speech, Signal Processing Letters*, 2002, 9(3): 81-84.
- [3] Li Li, Gao Zhiyun, Wang Xia, et al. The resolution simulating measurement setup for range-gated imaging system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34 (2): 165-168. (in Chinese)  
李丽, 高志允, 王霞, 等. 距离选通成像系统分辨率模拟测试装置[J]. 光子学报, 2005, 34(2): 165-168.
- [4] Jia Qiongyao, He Fengtao. Research for the problem of speckle homogenization in laser projectiondisplay [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(3): 400-405. (in Chinese)  
贾琼瑶, 贺锋涛. 激光投影显示中散斑均化问题的研究[J]. 激光技术, 2013, 37(3): 400-405.
- [5] Li Xia, Liu Weiqi, Tian Zhihui, et al. Speckle contrast reduction in laser display [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2008, 23(2): 153-154. (in Chinese)  
李霞, 刘伟奇, 田志辉, 等. 激光显示中散斑对比度的降低[J]. 液晶与显示, 2008, 23(2): 153-156.
- [6] Yu Guang, Wang Shuguo, Yu Junhua. Technology of digital speckle pattern interferometry and its applications [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(3): 237-240. (in Chinese)  
于光, 王树国, 于俊华. 数字散斑干涉技术及应用 [J]. 激光技术, 2002, 26(3): 237-240.
- [7] Zhang Yupeng, Wang Kaifu. Application of labview and MATLAB in ESPI image processing [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(6): 582-585. (in Chinese)  
张羽鹏, 王开福. LabVIEW 和 MATLAB 在电子散斑干涉图像处理中的应用[J]. 激光技术, 2009, 33(6): 582-585.
- [8] Wu Mei. Design and analyze of optical fiber microbend displacement sensor [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese)  
吴媚. 光纤微弯位移传感器的设计和分析[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [9] Hou Junfang, Pei Li, Li Zhuoxuan, et al. Development and application of optical fiber sensing technology[J]. *Electro-optic Technology Application*, 2012, 27(1): 49-53. (in Chinese)  
侯俊芳, 裴丽, 李卓轩, 等. 光纤传感技术的研究进展及应用[J]. 光电技术应用, 2012, 27(1): 49-53.
- [10] Le T M, Paul J S, H Al-Nashash, et al. New insights into image processing of cortical blood flow monitors using laser speckle imaging [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2007, 26(6): 833-842.
- [11] Yang Yi, Ding Quanxin, Zhang Chunfeng. New advance in airborne laser imaging technique [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 620-625. (in Chinese)  
羊毅, 丁全心, 张春风. 机载激光成像技术新进展 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(4): 620-625.
- [12] Wang Lijuan, Qiu Yishen, Chen Huaixi, et al. Analysis of speckle reduction by the vibrating fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(8): 1211-1214. (in Chinese)  
王丽娟, 邱怡申, 陈怀熹, 等. 利用振动光纤减弱激光散斑的研究[J]. 光子学报, 2011, 40(8): 1211-1214.
- [13] Zhang Dongling, He Fengtao, Feng Xiaoqiang, et al. High-resolution optical micro-survey system with blue illuminating source[J]. *Applied Optics*, 2005, 26(3): 57-59. (in Chinese)  
张东玲, 贺锋涛, 冯晓强, 等. 高分辨率蓝光光学显微测量系统[J]. 应用光学, 2005, 26(3): 57-59.
- [14] Ren Shuyan, Zhang Zhuo, Liu Guodong, et al. Restraining speckle of laser imaging system in accurate measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(3): 331-336. (in Chinese)  
任淑艳, 张琢, 刘国栋, 等. 精密测量中激光成像系统散斑的抑制因素[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3): 331-336.