

基于 FBG 的柔性多参量传感器制备与人体传感应用

何金,侯曼玲,彭作蕊,马裕宽,刘鹏宇,周昊*

(四川大学 电子信息学院,成都 610207)

摘要:针对人体健康数据收集需要多参量且柔性安全的传感器,提出利用基于光纤布喇格光栅(FBG)的柔性传感器,对人体温度、压力和运动状态进行检测。理论分析了温度和压力对 FBG 反射波长漂移量的影响,以及压力对光纤光功率的影响,建立了温度传感模型、压力传感模型和人体运动模型。基于柔性基底的传感器在温度传感和压力传感方面的性能都得到了不同程度的提升。最后通过实验验证了柔性基底光栅传感器对人体温度、压力以及运动状态的监测性能。

关键词:光纤布喇格光栅;聚合物;温度;压力;运动状态

中图分类号:TN253 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)11-0010-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.11.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



FBG-based flexible multi-parameter sensor preparation and human sensing application

HE Jin, HOU Manlin, PENG Zuorui, MA Yukuan, LIU Pengyu, ZHOU Hao*

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610207, China)

Abstract: For the collection of human health data, which requires multi-parameter and flexible safety sensor, this paper proposes to use the flexible sensor based on fiber Bragg grating (FBG) to detect the temperature, pressure and motion state of the human body. The effects of temperature and pressure on the drift of FBG reflection wavelength and the influence of pressure on the optical power of the fiber are theoretically analyzed, the temperature sensing model, pressure sensing model and human motion model are established. Sensors based on flexible substrates have improved performance in both temperature sensing and pressure sensing. Finally, the flexible base grating sensor is used to monitor the temperature, pressure and motion state of the human body.

Key words: fiber Bragg grating; polymer; temperature; pressure; motion state

0 引言

科学技术的发展使人们对健康数据测量的需求增大,同时也对测量时的舒适度提出了更高的要求。目前,市面上存在的能对人体生命体征(心率、呼吸和体温等)和运动状态进行分析测量的系统大多还是采用较硬的佩戴配饰,在一定程度上都会使人体产生不舒适感,降低了安全性、舒适性以及监测的准确性^[1]。

收稿日期:2019-05-05。

基金项目:国家自然科学基金项目(61705148)资助;大学生创新创业训练计划项目(C2018102255)资助。

作者简介:何金(1999-),女,在读本科生,主要研究方向为光纤传感器应用、光学传感、嵌入式系统以及数字图像处理与识别。已完成四川省省级大学生创新创业训练计划项目,获评为优秀项目;曾参加新加坡国立大学暑期实习项目(VR3D 游戏设计)。

* 通信作者:周昊(E-mail:zhoufirst@scu.edu.cn)。



光纤布喇格光栅(FBG)具有体积小、光纤系统相干兼容、附加损耗低以及没有电气危险等优点。如今高度发达的 FBG 制作工艺大大降低了其制作成本,聚合物封装也在提高 FBG 灵敏度的同时对光栅起保护作用,加上光栅的可编织性都使得 FBG 器件成为组成传感网络的理想元件^[2-4]。FBG 开始走向实用化,被广泛用于民用工程领域^[5],但将 FBG 用于人体健康参数的测量以及在微结构领域的应用较少。本文将 FBG 优异的光学传感性能和聚二甲基硅氧烷(PDMS)的高弹性、化学惰性相结合,采用基于 FBG 的柔性多参量传感器来测量人体体征和运动数据。

1 方案总体设计

由光纤耦合理论可知,外界环境条件变化会引起纤芯有效折射率和光栅周期的变化,通过测得的反射波长的变化可以得到外界物理量的变化^[6]。为了测试

柔性基底光栅传感器对人体温度、压力以及运动状态的监测响应情况,本文分别做了温度、压力和运动状态的传感实验。实验系统原理图如图1所示,宽带光源发出的红外光通过光环形器入射到单模光纤,然后入射到聚合物封装的光纤光栅传感器,传感器的反射光通过光环形器进入光谱分析仪。柔性多参量传感器包括多条FBG和外封装层PDMS薄膜,其中FBG包括测温度的FBG通道,测压力的FBG通道。

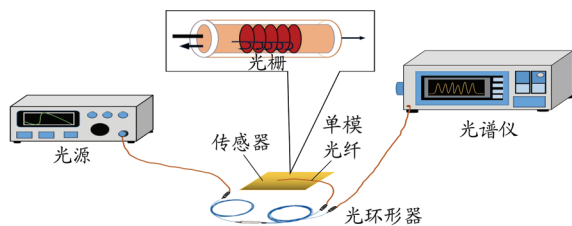


图1 实验装置原理图

2 实验与数据分析

2.1 PDMS 薄膜制作

本实验所用的PDMS薄膜为有机硅油,即聚二甲基硅氧烷,具有无毒、高透气性、疏水性、防水性和高弹性。每条通道的FBG接头处分别引出,与宽带光源和探头相连。有微小的温度与压力变化就足以使通道里传播的光波长发生变化,采用光谱仪测量波长,从而检测出温度和压力的变化。

PDMS薄膜制作过程如下:将PDMS单体和固化剂以10:1的比例混合,搅拌均匀后放进真空室抽真空,过滤其中的空气,防止制成的PDMS薄膜气泡不均匀;将培养皿放在匀胶机上旋涂,形成基底匀胶,随后加热固化,在70℃的恒温条件下完成初步固化。薄膜制作完成后,在基底上放置FBG,再覆盖一层PDMS薄膜,加热使之完全固化,至此完成传感器的制备。传感器制备示意图及实物图如图2所示。

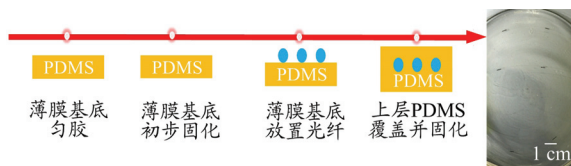


图2 传感器制备示意图及实物图

2.2 温度的传感实验与结果分析

根据图1搭建实验设备,将中心波长为1550 nm的FBG放置在恒温加热板上并用高温胶带固定非光栅区两端。在人体温度范围内逐步升高温度,记录无PDMS膜的FBG中心波长值,再将用PDMS封装的中

心波长为1550 nm的FBG进行相同操作。实验结果如图3所示:

◆无PDMS膜的FBG温度测量拟合曲线为: $\lambda=0.01003x+1550$,则FBG单位温度变化下引起的波长移位约为10.03 pm/℃。

◆有PDMS膜的FBG温度测量相应拟合曲线为: $\lambda=0.01442x+1549$,则FBG单位温度变化下引起的波长移位约为14.42 pm/℃。

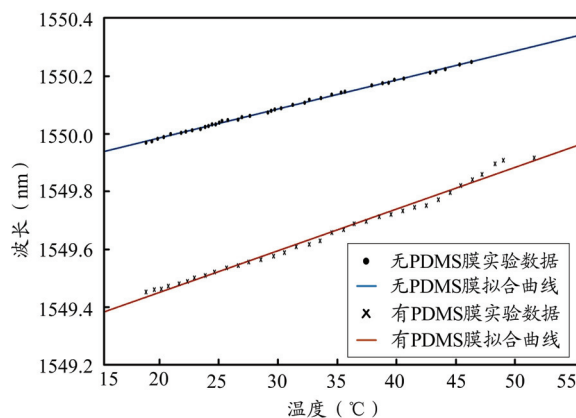


图3 温度测量曲线

从实验结果可以看出,FBG中心波长与温度有优良的线性关系,且实验值与理论值吻合较好。用PDMS封装后单位温度变化下引起的波长移位增大,灵敏度比原来增加44%,性能得到了较大提升。氧化硅材料热膨胀系数为0.5 ppm/℃,而PDMS材料热膨胀系数为301 ppm/℃^[7]。所以,具有PDMS基底的FBG传感器在受热过程中会因为PDMS的剧烈膨胀使得FBG受到额外的应力作用,从而提高对热传感的灵敏度。

2.3 压力的传感实验与结果分析

为了观察FBG传感器在有无PDMS膜封装的情况下对压力的响应情况,本文做了压力传感实验。在光栅传感区域放一块材质均匀的长3.5 cm、宽2 cm的橡胶薄块来尽量模拟足部对光栅区域的作用面积,同时也可以使光栅区受力均匀。在橡胶上施加不同大小的力,记录对应波长。所测得的FBG在压力变化下引起的波长移位实验结果如图4所示。

压力 ε 与中心波长相对变化 $\Delta\lambda_B$ 的关系为^[8]:

$$\Delta\lambda_B = K_\varepsilon \varepsilon \quad (1)$$

其中, K_ε 为FBG的应变灵敏度。由式(1)可知,压力与波长理论上呈线性关系。在实际数据(图3)中,0~60 kg范围内压力与波长呈现线性性质。为了模拟人体体征测量,本文采用人体足部对光纤传感器施压,所以实验数据有一定程度的波动,但依然有较好的线

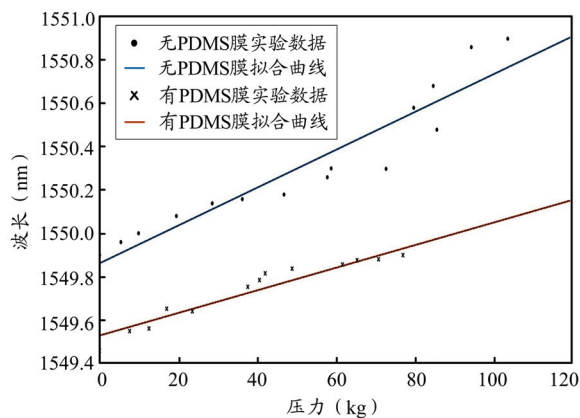


图4 压力响应曲线

性关系。此外,下文运动状态传感实验可以证明,此数据波动并不会影响人体动作的传感。从图4可以看出,加入柔性材料PDMS后FBG的线性更好,但其灵敏度稍稍下降。这是因为PDMS柔性基底的加入,使得足部的压力更加均匀地分散在整个接触面,所以测量数据波动较没有柔性基底的FBG更小,灵敏度也较小。该实验的目的是通过测量压力静态测量人体运动状态,每一只脚承受的压力是体重的一半,那么测量的最大范围是0~120 kg的压力,符合测量要求的范围。

3 运动状态的传感实验与结果分析

本文通过测量人体足底的压力状态与分布,来分析人体运动状态。正常人的足底压力分布结果显示,足底压力主要分布在前脚掌趾骨和脚后跟处,最小值出现在足底中部。由于前脚掌处趾骨受力大,而且在不同运动状态时受力有显著不同,所以本实验采用PDMS封装的光纤测试区置于实验者前脚掌趾骨处,实验者进行坐、站、走、跑和蹲的运动状态,测试FBG光功率随着时间的变化情况,得到的结果如图5、图6和图7所示。

图5中,实验者重复一坐一站的运动,每一次改变运动状态,都会产生尖锐的波峰。由站立到坐下的那一瞬间会导致在波峰后形成波谷,这是因为坐下后身体重量的绝大部分由上身支撑,使得足底压力骤减。由图5的实验数据可看出,在PDMS封装下的FBG传感器能够很好地反应坐与站这组运动状态。

图6中,前20 s的时间里实验者以低速慢跑,后35 s时间里实验者运动状态为行走,最后15 s进行小跑。跑步时双脚交替承担体重的频率更快,每次落地都是单脚后脚掌,所以图中跑步时间段内的波峰比行

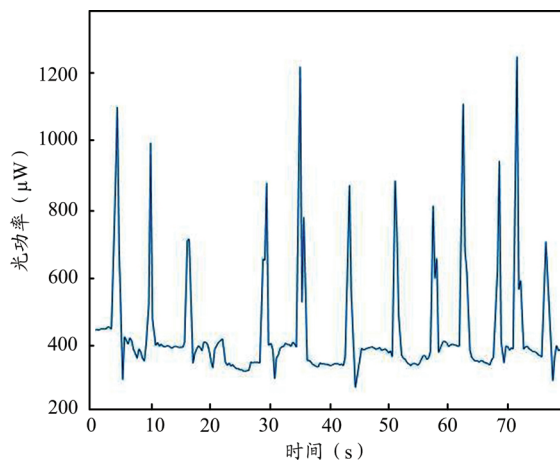


图5 光强随时间的变化(坐与站)

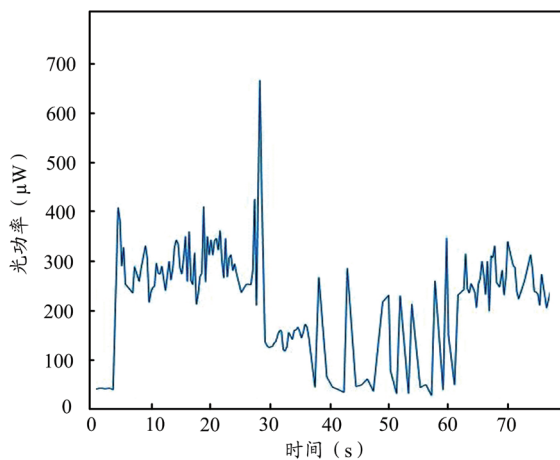


图6 光强随时间的变化(跑与走)

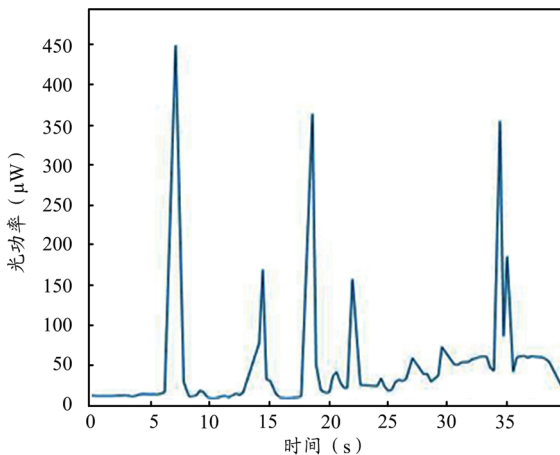


图7 光强随时间的变化(蹲与跳)

走时段的波峰平均高度更高,波峰之间也更稠密。由图6的实验数据可看出,在PDMS封装下的FBG传感器能够很好地反应跑与走这组运动状态。

图7中,较高的波峰对应下蹲运动,较矮的波峰对应弹跳动作。由于跳跃时有整个足部作为缓冲,而蹲

下主要由后脚掌受力,所以下蹲运动的波峰更高。由图7的实验数据可以看出,在PDMS封装下的FBG传感器能够很好地反应蹲与跳这组运动状态。

当人体处于运动状态时,人体足部向下施加随时间变化的不同压力,压力的改变导致FBG反射峰的移动,当入射光源不变时,反射峰和激光峰的交叠区域不同,从而导致输出的光功率发生变化。在每一次改变运动状态时,光栅的反射中心谱发生突变,即与激光输出谱的交叠区域发生突变,从而导致光功率发生突变,形成大波峰。当运动状态改变频率较大时,例如跑动,光功率发生的突变就多,即从图6中可以看出,形成的大波峰较为密集;同理,当进行原地缓慢运动时,如站与坐,图5显示的波峰较为稀疏。

由光的相对折射率公式可知,光的波长与光的折射率成正比,而本实验通过改变压力进而改变光栅区的折射率,折射率的变化会导致折射光波长的变化,因而光功率随压力增大而增大。当进行由坐到站的运动状态时,人体运动速度先增大后减小,即产生的运动加速度先垂直向下后竖直向上,导致施加在FBG上的压力先陡增,压力大于重力,后陡减,压力小于重力,最后缓慢增大趋于平缓,压力和人体重量一致。对应于图5可以看出,大波峰对应的行为是陡然站起,即压力陡增光功率陡增,之后的小波谷对应的行为是站稳减速状态,即压力陡减光功率陡减,最后趋于稳定但有毛刺的水平波动曲线。同理,当进行由站到坐的运动状态时,人体运动速度先增大后突变为零,即产生的运动加速度先垂直向下,后突变为零,突变产生的外力由椅子产生的支持力提供,导致施加在光纤上的压力先变大,即产生大波峰,在坐下的一刹那压力骤减且趋于平缓,即波峰之后是稳定但有毛刺的水平波动曲线,且由图5可知,坐状态的稳定曲线光功率平均值约为0.3 mW,站状态的稳定曲线光功率平均值约为0.4 mW,坐状态的稳定曲线光功率平均值小于站状态的稳定曲线光功率平均值,这也验证了坐状态的足底压力小于站状态的足底压力。另外2组运动状态分析过程类似。

4 结束语

本文提出一种基于FBG传感器对人体体征和运动状态监测的新方法,通过理论和实验研究了传感器的传感特性,得到以下主要结论:FBG可用聚合物PDMS封装提高传感器性能,传感器对温度的响应有着很好的线性关系,并且在温度传感灵敏度方面提高了44%;在压力传感方面,降低了压力数据波动的影响,在0~60 kg范围内与压力有着良好的线性关系。聚合物PDMS封装的FBG传感器可以很好地反应运动状态。

与现有技术相比,本文制备的多参量传感器有以下优点:①利用FBG和柔性材料结合,制备和测量技术简单,成本低廉,便于后期进一步集成和大规模生产;②光纤和PDMS结合可实现化学惰性人体可穿戴传感,可以实现多定点全方位多参数实时测量,测量得到的数据全面准确。本文的研究实现了人体温度、压力和运动状态等多参量传感,下一步研究将优化系统结构设计,实现更准确的参量监测,同时进一步提高器件集成度,实现可穿戴器件的应用。

参考文献:

- [1] 刘亚男,丛杉.可穿戴技术在人体健康监测中的应用进展[J].纺织报,2018,39(10):175-179.
- [2] 田新宇,杨昆,丁翔,等.石英光纤针织物编织性能研究[J].针织工业,2016(11):30-32.
- [3] 褚状状,游利兵,王庆胜,等.聚合物光纤光栅制备进展[J].激光技术,2018,42(1):11-18.
- [4] 杨昆,李美奇,张诚,等.经编光纤传感织物结构变化对光纤弯曲损耗的影响[J].纺织学报,2019,40(6):27-31.
- [5] 宋力,余志武.基于光纤光栅传感技术的重载铁路预应力混凝土梁疲劳损伤试验研究[J].建筑结构学报,2019,40(1):58-66.
- [6] LI Ruiya, CHEN Yiyang, TAN Tuegang, et al. Sensitivity Enhancement of FBG-Based Strain Sensor[J]. 2018, 18(5): 1-12.
- [7] WONG C P, RAJA S B. Thermal conductivity, elastic modulus, and coefficient of thermal expansion of polymer composites filled with ceramic particles for electronic packaging [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1999, 74(14): 3396-3403.
- [8] 刘颖刚,乔学光,贾振安,等.光纤光栅压力传感器及其温度效应研究[J].传感器技术,2004,23(11):21-23,26.

敬告作者

凡向本刊投稿的作者,除提供电子信箱地址外,还请提供联系电话。被录用的稿件在尚未刊登之前,如果作者离开原单位,请及时提供新的联系方式,以便编辑部邮寄稿费和赠送杂志。

本刊编辑部