

光纤可穿戴传感器在人体健康监测领域发展研究综述

郑洁清*, 马林, 范计锋

沈阳航空航天大学理学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2024年1月9日; 录用日期: 2024年3月20日; 发布日期: 2024年3月28日

摘要

随着健康意识和医疗服务水平的不断提高, 可穿戴传感设备正在以极快的速度发展。特别是近年来, 可穿戴技术与各种高科技设备融合的产品, 极大地改善了世界各地人们的生活, 减缓了人们的老化进程。随着高科技设备和可穿戴技术的结合, 光纤传感器已成为可穿戴领域的一股新兴力量, 对远程健康监测和医疗康复的发展产生了深远的影响。本文综述了可穿戴光纤传感器的类型, 分析了它们的一些制造细节和优劣势, 概述了可穿戴光纤传感器在人体健康监测中的实际应用, 从呼吸和心率、运动感知以及人机交互应用方面进行了总结, 最后对未来光学可穿戴设备的研究前景和新兴领域面临的挑战做出了展望。

关键词

可穿戴传感设备, 光纤传感器, 远程健康监测, 医疗康复

A Review of Research on the Development of Fibre-Optic Wearable Sensors for Human Health Monitoring

Jieqing Zheng*, Lin Ma, Jifeng Fan

College of Science, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning

Received: Jan. 9th, 2024; accepted: Mar. 20th, 2024; published: Mar. 28th, 2024

Abstract

Wearable sensing devices are developing at an extremely fast pace with increasing health aware-

*通讯作者, 第一作者。

文章引用: 郑洁清, 马林, 范计锋. 光纤可穿戴传感器在人体健康监测领域发展研究综述[J]. 传感器技术与应用, 2024, 12(2): 228-239. DOI: 10.12677/jsta.2024.122026

ness and medical services. Especially in recent years, products combining wearable technology and various high-tech devices have greatly improved the lives of people around the world and slowed down the aging process. With the combination of high-tech devices and wearable technology, fibre-optic sensors have become an emerging power in the wearable field, which has a profound impact on the development of remote health monitoring and medical rehabilitation. This paper reviews the types of wearable fibre-optic sensors, analyses some of their manufacturing details along with their advantages and disadvantages, outlines the practical applications of wearable fibre-optic sensors in human health monitoring in terms of respiration and heart rate, motion sensing and human-computer interaction applications. Finally, it provides an insight into the future prospects of research on optical wearable devices and the challenges facing the emerging field.

Keywords

Wearable Devices, Fibre-Optic Sensors, Remote Health Monitoring, Medical Rehabilitation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前,全球人口正呈现出持续增长和老龄化的趋势,联合国预测,到2050年,人类的预期寿命预计将增长22% [1]。为了评估人类的健康,特别是由于社会的老龄化,需要不断开发持续和动态的健康监测系统。作为一种能够实时监测人类健康的新兴技术,可穿戴传感器得到大力开发。在持续的市场需求的推动下,远程患者监测[2]、远程健康管理[3]等学科领域的发展速度正在加速增长。可穿戴技术不仅可以实现实时监控,用户还可以通过传感器阅读个人健康数据,了解自己的身体状况,此外,可穿戴设备还降低了医疗保健成本。可穿戴技术的及时性使用户能够实现早期预防的效果,而不必等到他们真正生病时才接受治疗,这大大降低了医疗治疗的难度。

可穿戴设备对传感器的要求更高,除了优越的传感能力外,卓越的佩戴舒适性是它们的另一个设计原则。柔性材料和器件的选择和包装已成为可穿戴传感器制造的关键。如今,柔性电子传感器在可穿戴设备市场[4]中占据着绝对的领先地位。在电子传感器的基础上,结合一些导电纳米材料和聚合物[5],制造出可穿戴电子传感器,其优异的机械灵活性和电传感性能使这些传感器在可穿戴领域闪耀。然而,电子传感器也存在一些缺陷,如一些电子金属元件的生物相容性较差,在长期佩戴时对人体健康有害,而且要抵抗电磁干扰(EMI)的影响是很困难的,而且电气安全等问题也需要进一步考虑。光学传感器的出现为人们提供了一个新的选择,它们已被广泛应用于各种领域,如航空航天[6]、海洋船舶[7]、桥梁和隧道[8]、医疗保健[9]和军事[10]。同时,光学传感器具有灵敏度高、响应速度快、生产成本低、重复性可靠、操作灵活、方便、安全可靠、生物相容性好等优点,是制备可穿戴传感器的电学替代解决方案。

本文第二章介绍了可用于制造人体佩戴的不同类型的光纤传感器,并对这些光纤传感器进行了分析,以寻找最适合可穿戴应用的光纤传感器类型。第三章重点介绍了实际应用,并综述了目前对人体各种生理特性监测的研究。最后,对全文进行了未来展望和总结,以预测光学可穿戴技术的未来发展趋势。

2. 光纤可穿戴传感器的类型

随着柔性材料和微纳米制造工艺的不断突破,对抗电磁干扰、优良的生物相容性、多功能集成等可

穿戴传感器的需求越来越多。因此,可穿戴传感技术的进一步发展面临着诸多挑战。光纤传感器由于其高灵敏度、轻重量、电磁免疫、化学稳定性和多路复用能力,提供了一种潜在的替代方案,本节将重点介绍不同种类的光纤传感器,包括基于光纤光栅、基于特种光纤和基于光纤干涉仪的传感器,并对比分析了它们的优劣势,具体如表 1 所示。

Table 1. Comparison of the advantages and disadvantages of different types of fibre optic sensors
表 1. 不同种类类型光纤传感器优劣势对比

传感器类型	优点	缺点
光纤光栅 均匀、长周期、倾斜、啁啾、 相移和螺旋光栅结构	1) 精度高, 耐久性好 2) 有出色的复用能力	1) 制造光栅的生产工艺复杂 2) 灵活性低、易破碎 3) 光栅封装技术有待提高 4) 解调设备昂贵, 成本高
特种光纤 聚合物光纤、微纳光纤	1) 低杨氏模量、高灵活性 2) 优异的生物相容性和耐腐蚀性 3) 响应速度、灵敏度和分辨率高	1) 制作工艺相对复杂 2) 需要与合适材料相结合
光纤干涉仪 马赫-曾德尔、萨格奈克、迈克尔逊和法布里-珀罗干涉仪	1) 抗干扰能力强 2) 稳定性高 3) 灵敏度高	1) 制作工艺要求高 2) 系统搭建复杂, 信号的解调与提取复杂

2.1. 基于光纤光栅传感器

典型的基于光纤光栅的传感器分为光纤布拉格光栅传感器(FBG)、倾斜光纤布拉格光栅(TFBG)和长周期光纤光栅传感器(LPG)。光纤光栅是一种空间相位光栅,利用光纤材料的光敏性,在光纤芯层中周期性地调制其折射率,最成熟的写入光纤光栅的方法是相位掩模法,它利用紫外光暴露光敏光纤,从而周期性地改变光纤芯的折射率。近年来,随着飞秒激光器等高功率超快光纤激光器的发展,使光纤光栅的制造变得更加容易、更加准确,具有广阔的市场和前景。光纤光栅传感器可以监测各种生理信号,包括心肺信号[11]、脉搏波信号[12]、体温信号[13]、身体姿势[14]和足底压力[15]可以通过解调光波长来监测。光纤光栅传感器的精度优于一般强度光纤传感器和干涉光纤传感器,其耐久性在传感领域表现突出,这对人类监测来说是一个巨大的优势,因为人类的生命体征总是在变化,健康监测可穿戴传感器一天完成数千次测量,而耐久性是长期监测的关键参数。

2.2. 基于特种光纤传感器

可穿戴传感器应柔软、有弹性,能最大限度地满足用户的舒适性,不干扰正常活动。传统的硅光纤传感器硬度高,只能承受较小的应变力,容易断裂,只允许在较小的应变范围内使用。因此,纯硅光纤在可穿戴技术传感器的制造中受到了很大的限制。为了促进可穿戴设备的便携性和集成性的发展,有一些特殊的光纤传感器,如聚合物光纤(POF)传感器和微纳光纤(MNF)传感器引起了广泛的研究兴趣,由聚合物制成的光纤传感器非常适合于克服这些挑战,与硅光纤相比,聚合物光纤弯曲灵活性较高,能承受较大的应变力,完全满足可穿戴技术的要求。在传感技术不断发展的过程中,对传感器的小型化和灵活性提出了更高的要求,小型化有助于提高传感器的响应速度、灵敏度和分辨率,在纳米技术的帮助下,光纤传感器也在向纳米尺寸发展,微纳光纤也已被制造成。聚二甲基硅氧烷(PDMS)和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)是制造 POF 和 MNF 最常用的材料,POF 传感器和 MNF 传感器与有机和无机材料相结合,具有优异的生物相容性和耐腐蚀性,长时间佩戴后仍能保持原有的传感性能,在人机交互控制、人类健康监测和运动障碍监测方面具有重要意义。基于可伸缩光波导的 POF 传感器通常由水凝胶、可生物降解聚合

物和弹性体制成, 光波导的变形会导致透射损耗, 从而导致透射光的强度变化, 这得益于 POF 低杨氏模量、高灵活性、高弹性极限和优良的生物相容性[16], 可以实现体温[17]、人体运动[18]、深呼吸[19]等生理信息的监测。

2.3. 基于光纤干涉仪传感器

干涉测量法利用了叠加原理, 其中传播光波的组合引起了干涉现象。基于光纤的通常有四种干涉仪, 为了采用低成本的传感器系统, 人们一直致力于开发基于光纤干涉仪的传感器, 如马赫 - 曾德尔干涉仪 (MZI)、萨格奈克干涉仪(SI)、迈克尔逊干涉仪(MI)和法布里 - 珀罗干涉仪(FPI)。MZI 有一个传感臂和一个参考臂, 生命体征会改变光纤传感臂的长度和折射率。对于 SI, 可以通过测量外部刺激下的干扰效应来检测以相反方向传输的两束光的相移。MI 的结构与 MZI 几乎完全相同, MI 采用反射模式, 使其在实验中更紧凑和方便。FPI 是可穿戴应用中最流行的传感器, 由于其体积小, 适用于监测心率、呼吸率、血压和体温[20]。

3. 光纤传感器在人体监测中的应用

电学传感器已被用来实现可穿戴传感设备来监测生理信号, 如心率信号、呼吸信号、关节角度信号等。然而, 大多数电学传感器通常需要复杂的生产过程, 并且容易受到电磁干扰的影响。此外, 柔性光学传感器因其高灵敏度、快速响应和抗电磁干扰, 在医疗保健、人机交互和机器人技术中已经发现了巨大的应用价值, 已被研究用于可穿戴健康监测。在本节中, 我们将介绍光纤传感器在典型的生理和身体功能传感应用中的最新成果。

3.1. 光纤传感应用于呼吸和心率监测

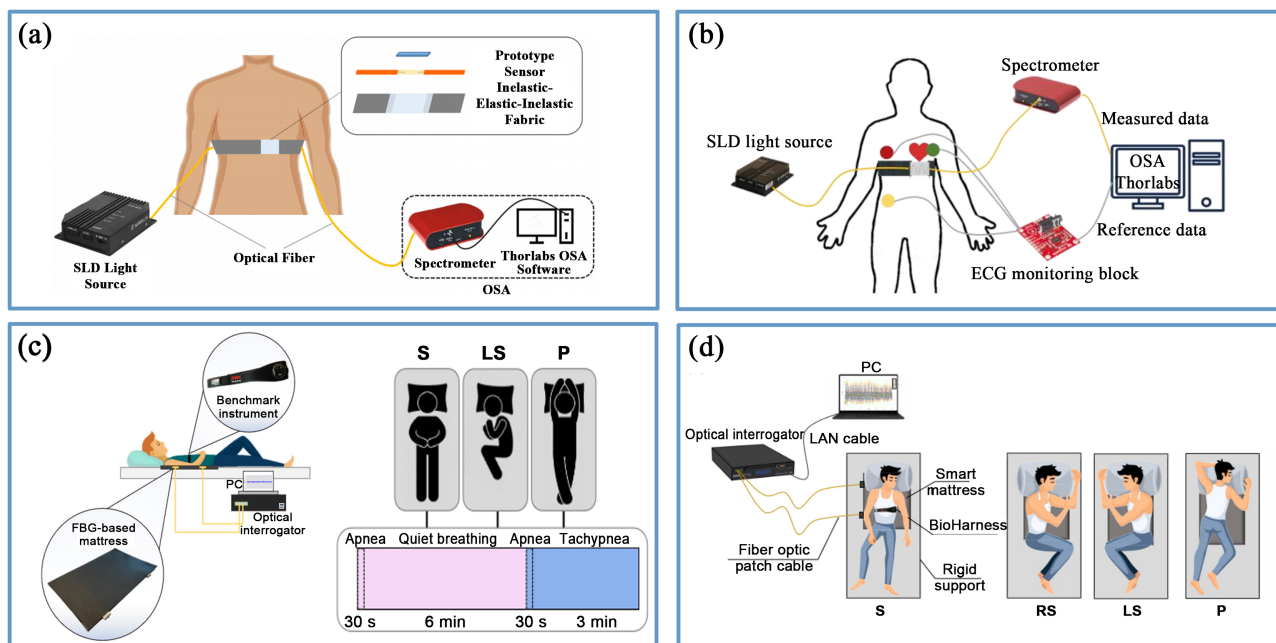


Figure 1. (a) Elastomer fibre optic based respiratory and heart rate monitoring system [21] (b) Waveform plastic fibre optic based cardiorespiratory monitoring system [24] (c) Smart mattress monitoring system for respiratory rate in different postures [11] (d) Smart mattress monitoring system for heart rate in different postures [25]

图 1. (a) 基于弹性体光纤呼吸和心率监测系统[21] (b) 基于波形塑料光纤心肺监测系统[24] (c) 智能床垫监测不同姿势下呼吸频率系统[11] (d) 智能床垫监测不同姿势下心率系统[25]

心脏监测可以帮助避免危及生命的情况如心律不齐，通常被称为心律失常。另一方面，呼吸监测在呼吸康复治疗中很重要，它可以测量呼吸频率和检测呼吸疾病，如睡眠呼吸暂停和哮喘。Zha 等人[21]提出了将一种可拉伸的弹性体光纤传感器集成到一个保护带，用于呼吸频率和心率监测，如图 1(a)所示，结果显示该传感器具有良好的精度和稳定性，呼吸频率和心率的 最大误差 分别为 1 bpm 和 3 bpm，平均绝对百分比误差(MAPE)为 5.25%，均方根误差(RMSE)为 1.28 bpm。Li 等人[22]报道了一种具有夹心结构的可拉伸聚合物光纤，该光纤将一个填充聚二甲基硅氧烷(PDMS)的硅胶管与两种常用的商业聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)光纤相结合，通过将可伸缩聚合物光纤集成到设计的睡眠监测床垫中，提高了床垫的压力灵敏度，以测量人体呼吸频率、心率和身体运动信息，显示呼吸和心率 最大误差 分别小于每分钟 1 次和每分钟 2 次。Leal-Junior 等人[23]基于聚合物光纤(POF)开发智能纺织品同时测量呼吸和心率，其中基本理论是基于光功率衰减的变化来监测心跳和呼吸活动，显示呼吸率和心率误差分别低于每分钟 2 次和 4 次。Shen 等人[24]提出了一种基于柔性的波形聚合物光纤可穿戴的心肺监测传感器，可伸缩的聚二甲基硅氧烷(PDMS)材料保持了聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)光纤的波形结构，连接到两侧的非弹性织物上形成传感器，原理是由心肺活动引起的人胸周长变化从而引起光功率的变化，并从采集的光功率信号中提取呼吸率和心率，如图 1(b)所示，结果显示该传感器具有较高的精度，呼吸率误差小于 9%，心率误差小于 3%。De Tommasi 等人[11] [25]通过将多个光纤光栅级联嵌入床垫中，当人在睡眠时，胸腔不断运动，光纤感应到应变时，将其输出信号输入到 PC 端，进行特定的滤波处理，由于光纤的灵敏度高，即可获得睡眠时任何状态下的呼吸速率和心率，如图 1(c)，图 1(d)所示。

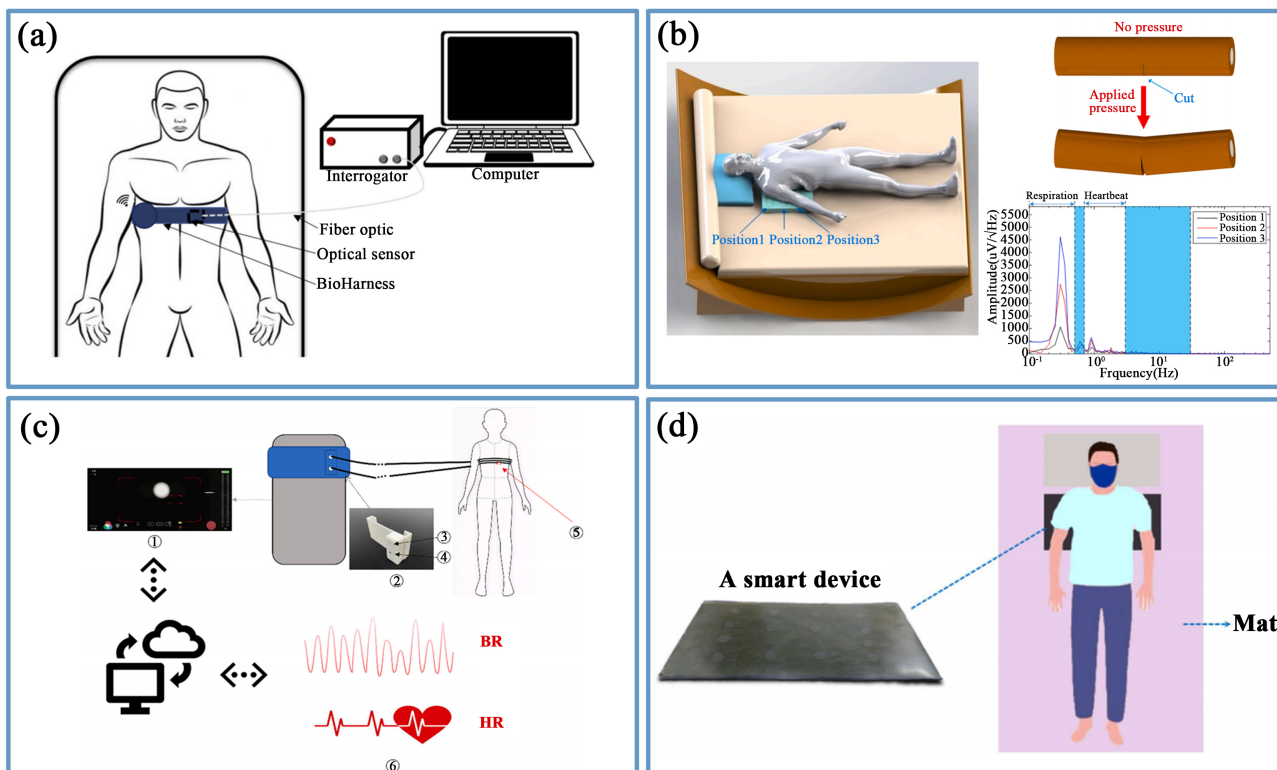


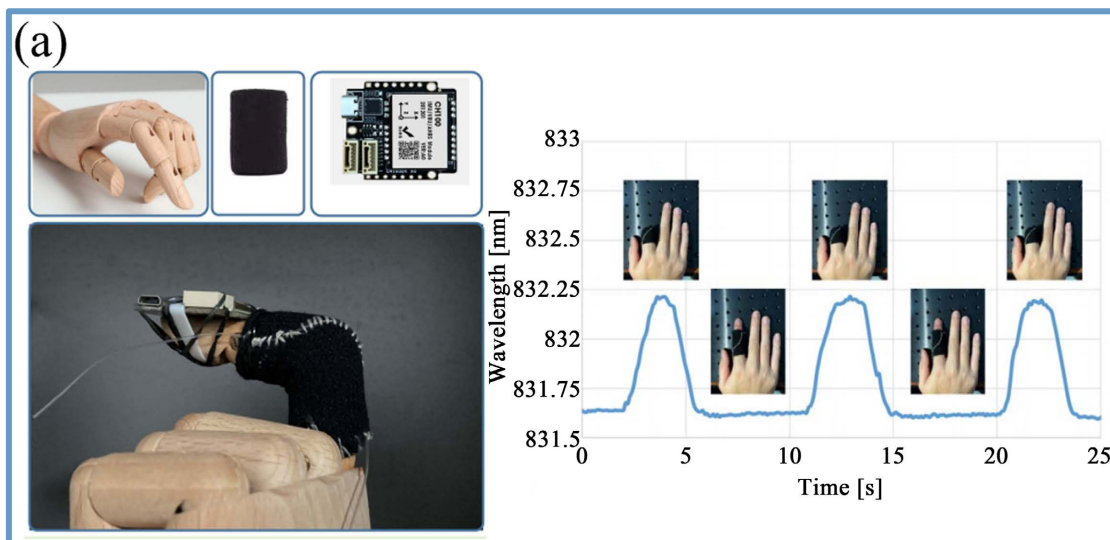
Figure 2. (a) 3D printed material based embedded FBG respiratory heart rate monitoring system [27] (b) Schematic of POF sensor embedded in a mattress and results of respiratory and heart rate monitoring [28] (c) Integration of POF with a smartphone for respiratory and heart rate monitoring system [29] (d) Schematic of FBG based smart device for respiratory monitoring [14]

图 2. (a) 基于 3D 打印材料嵌入式 FBG 呼吸心率监测系统[27] (b) 嵌入床垫的 POF 传感器示意图，以及呼吸和心率监测结果 [28] (c) POF 与智能手机集成用于呼吸和心率监测系统[29] (d) 基于 FBG 智能装置用于呼吸监测示意图[14]

Aitkulov 等人[26]提出了一种基于智能手机与塑料光纤(POF)集成的传感器,使用手电筒作为光源,使用照相机作为光电探测器,并使用一个3d打印连接器来执行光耦合,采用强度调制的方法来检测呼吸频率,结果显示在时域和频域以提取相关的呼吸频率。Tavares 等人[27]提出了一种基于光纤布拉格光栅(FBG)技术的3d打印传感器,用于呼吸频率和心率的监测,如图2(a)所示,测试了具有不同材料厚度和填充密度的传感器,选择了具有最佳计量性能的传感器,并对三个用户的呼吸频率和心率监测能力进行了评估。Han 等人[28]报道了嵌入在床垫中的基于塑料光纤(POF)压力传感器,用于测量呼吸和心率和睡眠性能监测,如图2(b)所示,这是基于压力下POFs两个端面之间的光耦合损失,结果表明,床垫可以区分不同睡眠状态下的行为状态,也可以检测不同姿势下的呼吸和心率值。Kuang 等人[29]报道了在智能手机中集成了低成本的塑料光纤,用于测量人体生理监测中的呼吸频率和心率,如图2(c)所示,结果表明,传感器可以监测心率和呼吸率在不同姿势(跑步、行走、站、蹲、躺)。Wang 等人[14]提出了基于聚二甲基硅氧烷(PDMS)的硅胶按钮封装的FBG阵列集成到多层材料结构中,最后实现了不同睡眠姿势下头部运动的监测和呼吸频率的监测,如图2(d)所示。Lo Presti 等人[30]介绍了一种利用四个光纤光栅,制作类似狗骨式心率监测带可穿戴系统,其系统结构提供了良好的身体粘附着力,并能够同时记录来自多个测量点的心率信号。

3.2. 光纤传感应用于运动感知

身体关节角度测量对于康复活动的持续监测具有非常的重要性。在图3和图4中,给出了几个典型的光纤传感器应用于关节角度和人体感知监测的实例。例如, Li 等人[31]报道了嵌入在硅胶管中的用于关节运动监测的光纤光栅(FBGs),将传感器集成在手指保护带上,并佩戴在机械手指装置上,用于手指关节弯曲监测,通过将手指、手臂和膝盖上的传感器与保护带相结合,如图3(a)所示,结果表明可以监测关节的弯曲情况,并能够区分关节的运动。Guo 等人[32]提出了一种基于可拉伸光纤布拉格光栅(FBG)的光学应变传感器,其原理是传感器由一个弯曲形状的FBG制造,其中一个可拉伸的衬底通过改变布拉格波长来响应应变变形,用于人体活动监测,如图3(b)所示,结果表明,应变传感器能够实时检测多种活动,包括呼吸、发声、面部表情和关节运动。Lo Presti 等人[33]提出了一种基于双光纤布拉格光栅传感器的多参数可穿戴系统,用于监测计算机工作者的颈部运动和呼吸活动,结果表明,该可穿戴系统能够很好地匹配颈部运动趋势(屈伸和轴向旋转),并估计安静呼吸和急促呼吸时的平均呼吸频率百分比误差分别为小于6.09%和1.90%。



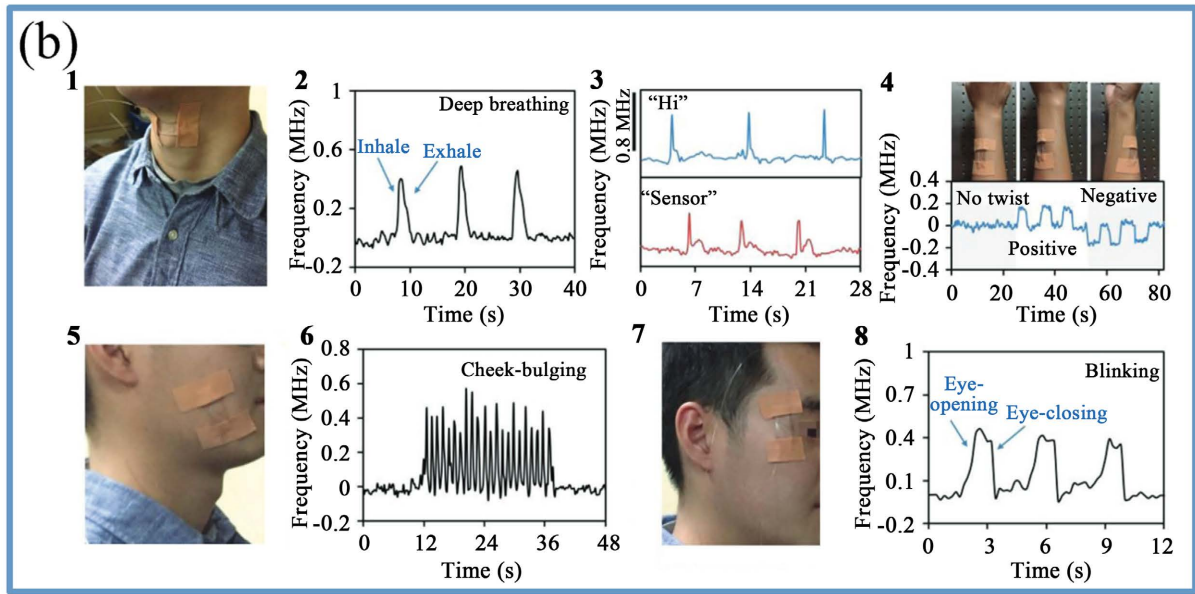


Figure 3. (a) Schematic and results of FBG-based for finger joint monitoring [31] (b) Schematic and results of FBG-based for respiration, vocalisation, muscle contraction and diastole, and facial emotion monitoring [32]
图 3. (a) 基于 FBG 用于手指关节监测示意图和结果[31] (b) 基于 FBG 用于呼吸、发声、肌肉收缩和舒张和面部表情监测示意图及结果[32]

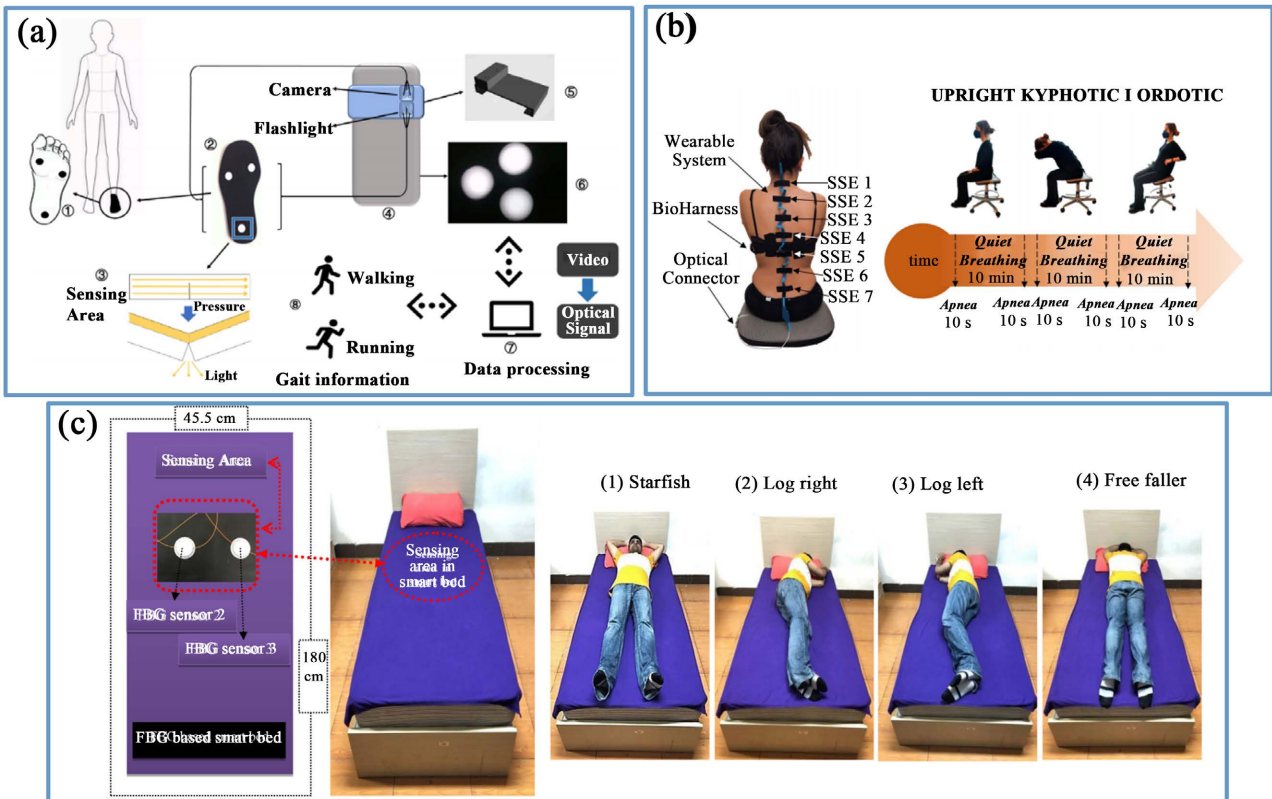


Figure 4. (a) POF-based smart insole and cellphone integrated sensing system [18] (b) Schematic diagram of FBG-based wearable system to monitor sitting breathing [36] (c) Schematic diagram of FBG-based pressure sensor to achieve sleep posture monitoring [37]
图 4. (a) 基于 POF 的智能鞋垫与手机集成传感系统[18] (b) 基于 FBG 可穿戴系统监测坐姿呼吸示意图[36] (c) 基于 FBG 压力传感器实现睡眠姿势监测示意图[37]

Cheng-Yu 等人[34]提出了一种基于光纤光栅的智能环，用于监测肘关节和膝关节的系统弯曲运动，结果表明，安装在肘关节和膝关节上的两个智能环的测量灵敏度分别为 0.0056 nm° 和 0.0276 nm° 。Mahmud 等人[15]报道了一种基于光纤布拉格光栅(FBG)的智能鞋底，能够同时测量足底压力和温度，并比较了所开发的基于光电的解决方案与市上广泛使用的足底压力测量和分析系统。Abro 等人[35]开发了一种基于 FBG 传感器的可监测身体姿势的智能传感服装，将 FBG 传感器嵌入在特殊硅胶中制备了 FBG 智能带，并在服装表面拼接柔性传感器，提出了一种相关的智能服装，结果发现，安装在手掌、手腕和肘关节位置的 FBG 传感器随着每一步角度的变化而显示出合理且持续的波长变化，可以用来研究由中风和骨折等不同疾病引起身体姿势的变化。Chen 等人[18]介绍了一种基于 POF 的智能鞋垫传感系统，它可以通过智能手机、POF 和鞋垫来监测人类的步态，根据鞋垫信号的反馈可以确定人类的步态模式，如行走、跑步、跳跃和坐着，如图 4(a)所示。Zaltieri 等人[36]提出了一种基于光纤布拉格光栅(FBG)技术的 7 个模块化传感元件设计的柔性可穿戴系统，以识别最常见的坐姿(即后凸、直立和前凸)，通过贝叶斯分类器对姿势识别表现良好(准确率 $> 96.9\%$)如图 4(b)所示。Abro 等人[37]通过熔融沉积制造(FDM)工艺使用聚乳酸(PLA)原料嵌入 FBG 传感器，制备了基于光纤光栅(FBG)的压力传感器，并将 FBG 压力传感器放置在智能床上，实现了睡眠姿势的监测，如图 4(c)所示。

3.3. 光纤传感应用于人机交互

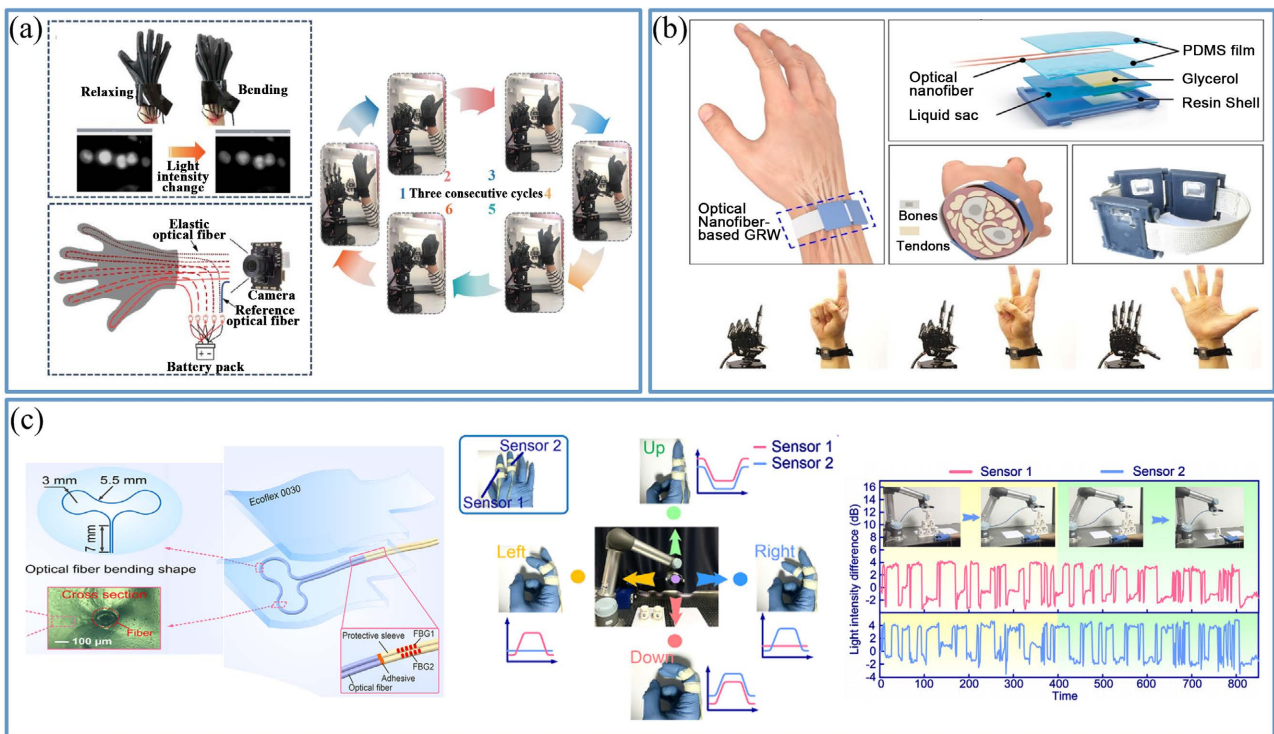


Figure 5. (a) Schematic of fibre optic sensor and glove integration system and control of robotic hand [38] (b) Schematic of micro-structured fibre optic based integration with wristband and realization of gesture recognition [39] (c) Schematic of bionic structured fibre optic and control of robotic arm movement [40]

图 5. (a) 光纤传感器和手套集成系统及控制机械手示意图[38] (b) 基于微结构光纤与腕带集成并实现手势识别示意图[39] (c) 仿生结构光纤示意图和控制机械臂移动示意图[40]

光纤传感应用于人机交互，对于生物医学和人机界面应用至关重要，在康复医学领域具有良好的发展前景。Yu 等人[38]提出了一种具有自校功能的自补偿弹性光纤传感器的低成本数据手套，能快速、准

确、有效地捕捉手指关节的运动，如图 5(a)所示，在手势捕捉测试中，它可以快速响应，并引导操纵器跟踪手势，其在运动监测、远程医疗和人机交互等方面具有广泛的发展潜力。Wang 等人[39]提出并实现了一种基于微结构光纤的手势识别腕带，它可以准确地识别手势并用于与机械手的交互，如图 5(b)所示，在机器学习算法的帮助下，对具有不同体质的测试者的最大识别准确率为 94%。Li 等人[40]开发了一种由可伸缩基底组成的仿生可伸缩光学应变传感器，其原理是通过两个光纤布拉格光栅中心波长的强度差，实现温度自补偿的大应变和弯曲角度测量，能够测量不同的人类活动，并实现人机交互控制，包括沉浸式虚拟现实、机器人远程交互控制和个人免提通信。结合机器学习技术，可以利用从传感器捕获的肌肉活动信号来实现手势分类，可用于获得假体的运动意图，在智能医疗和康复医学方面显示出了前景，如图 5(c)所示。Rao 等人[41]介绍了一种利用聚二甲基硅氧烷(PDMS)和一个硅胶管封装光纤布拉格光栅(FBGs)的可穿戴光纤传感器手套，用来实现手势识别和抓取物体的预测，实验结果表明，可穿戴传感手套可以在 $0^{\circ}\sim 100^{\circ}$ 范围内跟踪手指屈曲，最小测量误差为 0.176° ，最小标准差为 0.685° 。

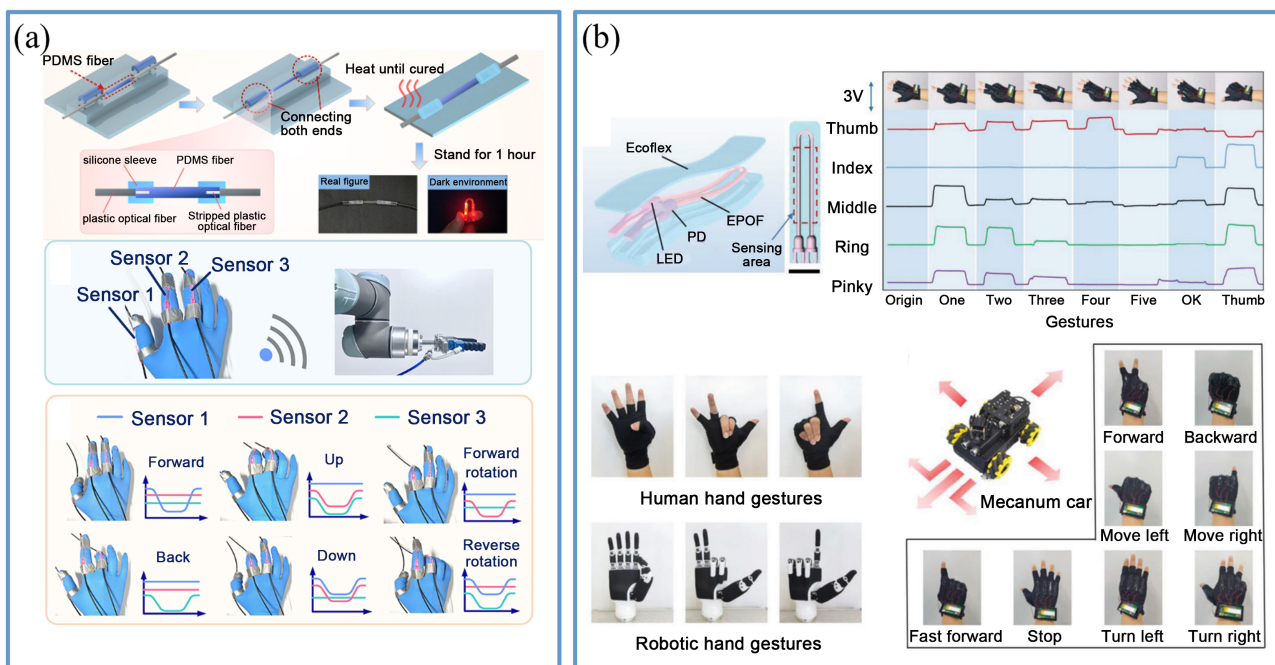


Figure 6. (a) Schematic diagram of AISP sensor structure and control robot [42] (b) Schematic diagram of EPOF sensor structure and implementation of manipulator and trolley control [43]

图 6. (a) AISP 传感器结构及控制机器人示意图[42] (b) EPOF 传感器结构及实现机械手和小车控制示意图[43]

Li 等人[42]开发了一种人工智能辅助可拉伸聚合物(AISP)传感器，用于疾病监测和检测，如图 6(a)所示，可以灵活地粘贴在皮肤表面，作为一种可穿戴设备，可以实时监测多种生理参数，并提出了一种基于 AISP 传感器的吞咽识别技术，准确率高达 88.89%，能够扩展到远程护理辅助系统，以满足危重患者的生理需求和日常护理，最后成功地进行了免提通信实验和机器人控制应用，表明了智能医疗保健中的应用前景。Zhang 等人[43]提出了一种将弹性体聚合物光纤(EPOF)部分包装的策略，将发光二极管(LED)和光电二极管(PD)包装成可伸缩和柔性硅胶贴片，用于医疗保健和人机交互应用，开发了一种配备了包装 EPOF 传感器的喉镜，可以承受 60 MPa 的压力，通过实时监测操作过程中的接触力，可以有效避免牙齿损伤，还制作了一种带有 5 个封装 EPOF 传感器的数据手套用于手势识别和遥控微型车辆，如图 6(b)所示。

4. 未来展望

在一个老龄化的世界里,对医疗保健和常规监测中的实时、低成本传感器的需求越来越大。在未来,可穿戴设备的领域将会蓬勃发展,各种高质量的光纤传感器也将会逐步投入使用。寻找新的材料,设计更合理的传感结构,解决传感器能量供应问题,以及无线通信技术的引入,是可穿戴领域持续努力的目标和方向。未来关于光学可穿戴设备的研究热点主要有以下3个方面:1)下一代个性化医疗和远程监测设备的开发方面,包括对人体心跳、脉搏、体温、血压和眼压等物理信号监测以及血液、汗液、泪液和唾液等体液中的化学标志物检测。2)光学可穿戴设备的应用场景拓展方面,随着人工智能、虚拟现实、5G/6G等前沿技术的发展,未来光学可穿戴设备在人体动作捕捉、语音识别、人机交互、互动娱乐等智能识别有待进一步发展。3)建立个人与健康信息网络的连接方面,通过光学可穿戴设备的实时监测,个人参与管理自己的健康状况,构建以人为本的健康系统,包括预防、诊断和治疗等各个护理阶段。

5. 结束语

本文总结了近年来可穿戴光纤传感器的一些最新进展。尽管光纤传感器在可穿戴领域的发展还处于起步阶段,尚未得到医学临床的验证,但这些日常监测的光纤传感器丰富了可穿戴领域的研究。光纤传感器具有抗电磁干扰能力的特点,使其适合与电子传感器一起使用,我们期待着一些具有许多优点的复合可穿戴传感器的出现,我们希望这项工作能够为研究人员在可穿戴光纤传感领域提供有益的进一步发展。

基金项目

2022年辽宁省教育厅科研项目 光致聚合全息存储材料制备及性能优化研究(项目编号:LJKMZ20220544)。

参考文献

- [1] Lutz, W., Sanderson, W. and Scherbov, S. (2008) The Coming Acceleration of Global Population Ageing. *Nature*, **451**, 716-719. <https://doi.org/10.1038/nature06516>
- [2] McGillion, M.H., Allan, K., Ross-Howe, S., Jiang, W., Graham, M., Marcucci, M., Johnson, A., Scott, T., Ouellette, C., Kocetkov, D., Lounsbury, J., Bird, M., Harsha, P., Sanchez, K., Harvey, V., Vincent, J., Borges, F.K., Carroll, S.L., Peter, E., Patel, A., Bergh, S. and Devereaux, P.J. (2022) Beyond Wellness Monitoring: Continuous Multiparameter Remote Automated Monitoring of Patients. *Canadian Journal of Cardiology*, **38**, 267-278. <https://doi.org/10.1016/j.cjca.2021.10.011>
- [3] Cowie, M.R. and Lam, C.S.P. (2021) Remote Monitoring and Digital Health Tools in CVD Management. *Nature Reviews Cardiology*, **18**, 457-458. <https://doi.org/10.1038/s41569-021-00548-x>
- [4] Fang, H., Guo, J. and Wu, H. (2022) Wearable Triboelectric Devices for Haptic Perception and VR/AR Applications. *Nano Energy*, **96**, Article ID: 107112. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107112>
- [5] Pan, D., Hu, J., Wang, B., Xia, X., Cheng, Y., Wang, C.H. and Lu, Y. (2023) Biomimetic Wearable Sensors: Emerging Combination of Intelligence and Electronics. *Advanced Science*, **11**, e2303264. <https://doi.org/10.1002/advs.202303264>
- [6] Rovera, A., Tancau, A., Boetti, N., Dalla Vedova, M.D.L., Maggiore, P. and Janner, D. (2023) Fiber Optic Sensors for Harsh and High Radiation Environments in Aerospace Applications. *Sensors*, **23**, Article 2512. <https://doi.org/10.3390/s23052512>
- [7] Min, R., Liu, Z., Pereira, L., Yang, C., Sui, Q. and Marques, C. (2021) Optical Fiber Sensing for Marine Environment and Marine Structural Health Monitoring: A Review. *Optics & Laser Technology*, **140**, Article ID: 107082. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107082>
- [8] He, T., Wang, W., He, B.G. and Chen, J. (2023) Review on Optical Fiber Sensors for Hazardous-Gas Monitoring in Mines and Tunnels. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **72**, 1-22. <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3273691>

- [9] Sadani, K., Nag, P., Thian, X.Y. and Mukherji, S. (2022) Enzymatic Optical Biosensors for Healthcare Applications. *Biosensors and Bioelectronics: X*, **12**, Article ID: 100278. <https://doi.org/10.1016/j.biosx.2022.100278>
- [10] Luo, R., Li, G., Fan, S. and Safara, F. (2021) Location-Based Explosion Detection in Wireless Optical Pressure Sensor Networks Using Bat Optimization Algorithm. *Wireless Personal Communications*, **127**, 845-868. <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08442-y>
- [11] De Tommasi, F., Massaroni, C., Caponero, M.A., Carassiti, M., Schena, E. and Lo Presti, D. (2023) FBG-Based Mattress for Heart Rate Monitoring in Different Breathing Conditions. *IEEE Sensors Journal*, **23**, 14114-14122. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3275323>
- [12] Ushakov, N., Markvart, A., Kulik, D. and Liokumovich, L. (2021) Comparison of Pulse Wave Signal Monitoring Techniques with Different Fiber-Optic Interferometric Sensing Elements. *Photonics*, **8**, Article 142. <https://doi.org/10.3390/photonics8050142>
- [13] Wang, X., Jiang, Y., Xu, S., Liu, H. and Li, X. (2022) Fiber Bragg Grating-Based Smart Garment for Monitoring Human Body Temperature. *Sensors*, **22**, Article 4252. <https://doi.org/10.3390/s22114252>
- [14] Wang, H., Zheng, J., Nie, Q., Zhao, C., Wang, Z., Kumar, S., Marques, C., Min, R. and Hu, X. (2023) SleepSense: Smart Pillow with Pressure-Sensitive FBG-Embedded Silicone Buttons. *IEEE Sensors Journal*, **23**, 19324-19331. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3295114>
- [15] Mahmud, S., Khandakar, A., Chowdhury, M.E.H., AbdulMoniem, M., Bin Ibne Reaz, M., Bin Mahub, Z., Sadasivuni, K.K., Murugappan, M. and Alhatou, M. (2023) Fiber Bragg Gratings Based Smart Insole to Measure Plantar Pressure and Temperature. *Sensors and Actuators A: Physical*, **350**, Article ID: 114092. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.114092>
- [16] Min, R., Hu, X., Pereira, L., Simone Soares, M., Silva, L.C.B., Wang, G., Martins, L., Qu, H., Antunes, P., Marques, C. and Li, X. (2022) Polymer Optical Fiber for Monitoring Human Physiological and Body Function: A Comprehensive Review on Mechanisms, Materials, and Applications. *Optics & Laser Technology*, **147**, Article ID: 107626. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107626>
- [17] Guo, J., Yang, C., Dai, Q. and Kong, L. (2019) Soft and Stretchable Polymeric Optical Waveguide-Based Sensors for Wearable and Biomedical Applications. *Sensors*, **19**, Article 3771. <https://doi.org/10.3390/s19173771>
- [18] Chen, J., Teng, C., Kuang, R., Wang, Z., Yao, Y., Ortega, B., Marques, C., Li, X. and Min, R. (2023) Plastic Optical Fiber Integrated with Smartphone for Gait Monitoring. *IEEE Sensors Journal*, **23**, 18207-18218. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3291173>
- [19] Ahn, D., Park, Y.J., Shin, J.D., Lee, J. and Park, J. (2018) Plastic Optical Fiber Respiration Sensor Based on In-Fiber Microholes. *Microwave and Optical Technology Letters*, **61**, 120-124. <https://doi.org/10.1002/mop.31524>
- [20] Qi, Y., Cong, B., Liu, Z., Gong, C., Li, F., Hu, T. and Liu, Y. (2021) All-Fiber Sensitivity-Enhanced Pressure Sensor Based on Sagnac and F-P Interferometer. *Optik*, **243**, Article ID: 167359. <https://doi.org/10.1016/j.jileo.2021.167359>
- [21] Zha, B., Wang, Z., Li, L., Hu, X., Ortega, B., Li, X. and Min, R. (2023) Wearable Cardiorespiratory Monitoring with Stretchable Elastomer Optical Fiber. *Biomedical Optics Express*, **14**, 2260-2275. <https://doi.org/10.1364/BOE.490034>
- [22] Li, L., Yang, C., Wang, Z., Xiao, K. and Min, R. (2024) Stretchable Polymer Optical Fiber Embedded in the Mattress for Respiratory and Heart Rate Monitoring. *Optics & Laser Technology*, **171**, Article ID: 110356. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110356>
- [23] Leal-Junior, A.G., Díaz, C.R., Leitão, C., Pontes, M.J., Marques, C. and Frizera, A. (2019) Polymer Optical Fiber-Based Sensor for Simultaneous Measurement of Breath and Heart Rate under Dynamic Movements. *Optics & Laser Technology*, **109**, 429-436. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.08.036>
- [24] Shen, L., Wang, Z., Xiao, K., Teng, C., Kumar, S., Li, X. and Min, R. (2023) WaveFlex Sensor: Advancing Wearable Cardiorespiratory Monitoring with Flexible Wave-Shaped Polymer Optical Fiber. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **29**, 1-8. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2023.3235723>
- [25] De Tommasi, F., Presti, D.L., Caponero, M.A., Carassiti, M., Schena, E. and Massaroni, C. (2023) Smart Mattress Based on Multipoint Fiber Bragg Gratings for Respiratory Rate Monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **72**, 1-10. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3232615>
- [26] Aitkulov, A. and Tosi, D. (2019) Optical Fiber Sensor Based on Plastic Optical Fiber and Smartphone for Measurement of the Breathing Rate. *IEEE Sensors Journal*, **19**, 3282-3287. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2894834>
- [27] Tavares, C., Leitao, C., Lo Presti, D., Domingues, M.F., Alberto, N., Silva, H. and Antunes, P. (2022) Respiratory and Heart Rate Monitoring Using an FBG 3D-Printed Wearable System. *Biomedical Optics Express*, **13**, 2299-2311. <https://doi.org/10.1364/BOE.452115>
- [28] Han, P., Li, L., Zhang, H., Guan, L., Marques, C., Savović, S., Ortega, B., Min, R. and Li, X. (2021) Low-Cost Plastic Optical Fiber Sensor Embedded in Mattress for Sleep Performance Monitoring. *Optical Fiber Technology*, **64**, Article ID: 102541. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102541>

- [29] Kuang, R., Ye, Y., Chen, Z., He, R., Savović, I., Djordjevich, A., Savović, S., Ortega, B., Marques, C., Li, X. and Min, R. (2022) Low-Cost Plastic Optical Fiber Integrated with Smartphone for Human Physiological Monitoring. *Optical Fiber Technology*, **71**, Article ID: 102947. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.102947>
- [30] Lo Presti, D., Santucci, F., Massaroni, C., Formica, D., Setola, R. and Schena, E. (2021) A Multi-Point Heart Rate Monitoring Using a Soft Wearable System Based on Fiber Optic Technology. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 21162. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00574-2>
- [31] Li, L., He, R., Soares, M.S., Savovic, S., Hu, X., Marques, C., Min, R. and Li, X. (2021) Embedded FBG-Based Sensor for Joint Movement Monitoring. *IEEE Sensors Journal*, **21**, 26793-26798. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3120995>
- [32] Guo, J., Zhao, K., Zhou, B., Ning, W., Jiang, K., Yang, C., Kong, L. and Dai, Q. (2019) Wearable and Skin-Mountable Fiber-Optic Strain Sensors Interrogated by a Free-Running, Dual-Comb Fiber Laser. *Advanced Optical Materials*, **7**, Article ID: 1900086. <https://doi.org/10.1002/adom.201900086>
- [33] Lo Presti, D., Carnevale, A., D'Abbraccio, J., Massari, L., Massaroni, C., Sabbadini, R., Zaltieri, M., Di Tocco, J., Bravi, M., Miccinilli, S., Sterzi, S., Longo, U.G., Denaro, V., Caponero, M.A., Formica, D., Oddo, C.M. and Schena, E. (2020) A Multi-Parametric Wearable System to Monitor Neck Movements and Respiratory Frequency of Computer Workers. *Sensors*, **20**, Article 536. <https://doi.org/10.3390/s20020536>
- [34] Cheng-Yu, H., Ahmed Abro, Z., Yi-Fan, Z. and Ahmed Lakho, R. (2019) An FBG-Based Smart Wearable Ring Fabricated Using FDM for Monitoring Body Joint Motion. *Journal of Industrial Textiles*, **50**, 1660-1673. <https://doi.org/10.1177/1528083719870204>
- [35] Abro, Z.A., Zhang, Y.F., Hong, C.Y., Lakho, R.A. and Chen, N.L. (2018) Development of A Smart Garment for Monitoring Body Postures Based on FBG and Flex Sensing Technologies. *Sensors and Actuators A: Physical*, **272**, 153-160. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.01.052>
- [36] Zaltieri, M., Lo Presti, D., Bravi, M., Caponero, M.A., Sterzi, S., Schena, E. and Massaroni, C. (2023) Assessment of a Multi-Sensor FBG-Based Wearable System in Sitting Postures Recognition and Respiratory Rate Evaluation of Office Workers. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **70**, 1673-1682. <https://doi.org/10.1109/TBME.2022.3225065>
- [37] Abro, Z.A., Hong, C., Zhang, Y., Siddiqui, M.Q., Rehan Abbasi, A.M., Abro, Z. and Bin Tariq, S.Q. (2021) Development of FBG Pressure Sensors Using FDM Technique for Monitoring Sleeping Postures. *Sensors and Actuators A: Physical*, **331**, Article ID: 112921. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112921>
- [38] Yu, H., Zheng, D., Liu, Y., Chen, S., Wang, X. and Peng, W. (2022) Data Glove with Self-Compensation Mechanism Based on High-Sensitive Elastic Fiber-Optic Sensor. *Polymers*, **15**, Article 100. <https://doi.org/10.3390/polym15010100>
- [39] Wang, S., Wang, X., Wang, S., Yu, W., Yu, L., Hou, L., Tang, Y., Zhang, Z., Yao, N., Cao, C., Dong, H., Zhang, L. and Bao, H. (2023) Optical-Nanofiber-Enabled Gesture-Recognition Wristband for Human-Machine Interaction with the Assistance of Machine Learning. *Advanced Intelligent Systems*, **5**, Article ID: 2200412. <https://doi.org/10.1002/aisy.202200412>
- [40] Li, J., Liu, J., Li, C., Zhang, H. and Li, Y. (2020) Wearable Wrist Movement Monitoring Using Dual Surface-Treated Plastic Optical Fibers. *Materials*, **13**, Article 3291. <https://doi.org/10.3390/ma13153291>
- [41] Rao, H., Luo, B., Wu, D., Yi, P., Chen, F., Shi, S., Zou, X., Chen, Y. and Zhao, M. (2023) Study on the Design and Performance of a Glove Based on the FBG Array for Hand Posture Sensing. *Sensors*, **23**, Article 8495. <https://doi.org/10.3390/s23208495>
- [42] Li, T., Wang, Q., Su, Y., Qiao, F., Pei, Q., Li, X., Tan, Y. and Zhou, Z. (2023) AI-Assisted Disease Monitoring Using Stretchable Polymer-Based Sensors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **15**, 30924-30934. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c01970>
- [43] Zhang, Z. and Zhang, L. (2024) Packaged Elastomeric Optical Fiber Sensors for Healthcare Monitoring and Human-Machine Interaction. *Advanced Materials Technologies*, **9**, Article ID: 2301415. <https://doi.org/10.1002/admt.202301415>