

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104707

软体仿生机械手柔性触觉感知技术研究进展*

谷可欣¹ 李红¹ 李坤阳² 宋言明² 孙广开¹ 祝连庆^{1,2,3}

(1. 北京信息科技大学光电测试技术及仪器教育部重点实验室 北京 100192; 2. 北京信息科技大学光纤传感与系统北京实验室 北京 100016; 3. 光电信息与仪器北京市工程研究中心 北京 100016)

摘要: 柔性触觉感知信息获取是软体仿生机械手自主操纵的关键反馈环节,它提供了关于仿生机械手和物体接触点的相互作用力和表面特性的信息。从敏感材料、结构设计、制备方法到信号获取分析等方面,应用于软体机械手的柔性触觉感知方法近年来取得了一定进展,但是存在若干问题限制了技术的应用发展。为此,梳理了软体仿生机械手柔性触觉感知的概念与内涵,分析了相关的重要参数和设计原则,汇总分类讨论了不同结构的柔性触觉传感器的设计思想及其性能和应用,最后对软体仿生机械手柔性触觉传感器的发展前景提出了展望与思考。

关键词: 软体仿生机械手; 触觉感知; 柔性触觉传感器; 敏感材料; 光纤

中图分类号: TH73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research progress of flexible tactile sensing technology for soft biomimetic manipulator

Gu Kexin¹ Li Hong¹ Li Kunyang² Song Yanming² Sun Guangkai¹ Zhu Lianqing^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China; 3. Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing 100016, China)

Abstract: The acquisition of flexible tactile perception information is the key feedback of soft bionic manipulator to achieve autonomous control. The information of interaction force and surface characteristics is provided, which is generated between the bionic manipulator and grasping contact point. In recent years, although the flexible tactile sensing method applied to software manipulator has made some progress in sensitive materials, structural design, preparation methods and signal acquisition and analysis, there are some problems that limit the application and development of the technology. In view of this, this paper sorts out the concept and connotation of flexible tactile sensing technology for software bionic manipulator, and its related parameters and design principles are systematically analyzed. The design ideas, performance and applications of flexible tactile sensors with different structures are summarized, classified and discussed. Finally, the discussion and the prospect of development for the flexible tactile sensor for soft bionic manipulator are presented in the conclusion.

Keywords: soft bionic manipulator; tactile sensing; flexible tactile sensor; sensitive material; optical fiber

0 引言

机械手作为智能机器人产业的重要分支,已成为国

家战略智能装备高新技术创新驱动的典型研发方向^[1]。为解放人力,机械手在工业生产活动中实现机械化和自动化发挥重要作用,传统的刚性机器人灵巧仿人手的机械操作装置已经被广泛应用于人类社会生活和生产中,

收稿日期: 2021-09-04 Received Date: 2021-09-04

* 基金项目: 国家自然科学基金(61903042)、北京市自然科学基金(4194077, 4212048)、生物医学检测技术及仪器北京实验室纵向课题(Z2018020)、北京市自然基金-市教委联合基金(KZ201911232044)项目资助

其结构主要由金属材料构成,负责重复、危险的工作。在工作过程中进行抓取反馈时,为了确保被抓握的物体不受损伤,对多自由度的刚性仿生机械手的控制必须精准,而程序控制较为复杂^[2]。随着科技的发展,人们在人-机交互、机-环境交互等领域的安全性、友好性以及灵活性等诸多需求,使得对机械手的机械操作装置进行研究和改进等工作变得尤为重要^[3]。例如,对表面易损伤、细小易碎的物品分拣识别,医疗手术辅助等方面的应用,机械手触觉感知技术需要具有高的柔顺性、好的贴附性、绝对的安全性等。刚性仿生机械手对这样的需求往往不能胜任,机械材料很难与交互的环境刚度相匹配,而且实现刚性机械手精准控制及安全交互的设计复杂、技术难度大、成本高,不利于推广应用。因此,应用软材料设计制造的软体仿生机械手受到广泛关注与持续的研究^[4]。

软体仿生机械手的压触觉感知技术是决定分拣识别智能化的核心技术^[5],具有压触觉感知的智能机械手在军事探测、医疗康复、农业生产、加工制造等领域具有广泛的应用前景^[6]。软体仿生机械手触觉传感器目前的研究目标是在各种物理量或“类生理”信号的检测能力上接近甚至超越人类皮肤或动物感觉器官的感知能力。虽然不同形状的触觉传感器通过不同的工作原理(如压阻、压电、电容、电磁、磁电等)感知物理量,但材料和结构的选择也极大地影响了器件的整体性能和工艺实现,尤其是灵敏度和检测阈值。发挥柔性材料的“机械智能”,真正的从材料性能上更加接近生物体本身,而不仅仅是一种功能的仿生,从而获得像生物一样灵活,环境适应能力强的软体仿生机械手柔性触觉感知系统^[7]。因此,为了保证柔性触觉传感器在多自由度的机械手上实现测量数据的精确与速度,必须考虑传感器的结构材料对机械手触觉感知功能的影响^[8]。

本文首先对用于软体仿生机械手的柔性触觉传感器的重要参数进行介绍,然后重点介绍传感器的设计方法和性能。从两类不同的材料选取出发,分别讨论了不同结构的柔性触觉传感器的设计方法,性能及其应用。通过分析各种类型传感器的特点,最后给出了这几种传感器存在的问题和发展方向。

1 概念与内涵

触觉感知是通过与物体接触来确定物理属性的过程,信息交互是触觉传感器的基本特征。狭义的触觉是指外部压力作用于触觉感受器所引起的肤觉,广义的触觉是指触觉、滑觉、压觉、冷热觉等外部刺激的统称。触觉发展较晚,目前尚无成熟的产品面世,常用的触觉再现手段是视觉观测物理表面信息来反推触觉,软体机械手可以在非结构化环境中操作并控制未知物体^[9]。

随着智能传感、智能机器人技术的发展,触觉感知包含的信息不仅反映了机器人与环境的交互情况,而且可通过数据处理得到所接触目标的各种物理属性,如位置、形状、刚度、柔软度、纹理、导热性、黏滞性等,因此设计传感器时需要考虑如下要求^[10-16]:

1) 响应。在人机交互任务中,触觉传感器须提供接触存在与否的判断以及接触力强度。

2) 探索。在探索过程中,触觉传感器应尽量提供如下信息:硬度和温度等表面特性;形状^[7]的结构特性;和振动检测的功能特性^[12]。

3) 控制。在自主操作任务中,触觉数据作为控制参数用于:滑动检测;抓握稳定性的估计^[13];表面法线和曲率测量^[14];实现稳定抓取的切向力和法向力测量^[15];和用于指尖力控制的接触力测量^[16]。

应用领域不同,传感器的设计标准也不同,Dahiya等^[17]通过对研究人员、工业制造商以及产品用户进行问卷调查,最先归拢了触觉传感器的设计规格。触觉传感器的基本设计标准已经在仿生机器人^[18]、生物医学^[19]、仿生手^[20]以及大型触觉系统^[21]中有过表述。在自主操作应用中,柔性触觉传感器应满足物体表征、识别和操作的要求^[22]。

1) 触觉传感阵列空间分辨率的要求取决于要识别的物体的大小和传感器在机械手上的位置。高空间分辨率可以识别更小的物体,并提取更高精度的特征,但灵敏度会变小,处理时间更长。

2) 触觉传感器的灵敏度指单位力作用下的响应变化量。可检测的微小变化意味着高灵敏度,可以检测接触力的微小变化,但传感器的动态范围会缩小,空间分辨率降低。

3) 对频率响应的要求取决于应用。一般来说,触觉传感器可以是动态的或静态的。高频率响应会对接触力水平变化反应快速,但空间分辨率和动态范围会降低。

4) 迟滞和形变恢复时间应该尽可能低。

21世纪以来,是新技术、新材料和新工艺的高速发展时期,根据应用需求研究人员一直致力于发展柔性、轻巧、高空间分辨率、高灵敏度的触觉传感器,特别是随着触觉传感器从传统的机器人领域应用到康复医疗、假肢以及人机交互等领域,以柔性化、轻量化、可扩展、多功能的触觉皮肤为代表的新型柔性触觉传感器的研究成为当前研究的热点^[23-24]。软体仿生机械手运用触觉传感器来模拟人手神经元,提供神经形态的触觉信息^[25]。如图1所示,多层仿生电子真皮由包裹在橡胶中的导电和压阻纺织品组成。

2 机械手柔性触觉传感器的研究进展

触觉传感器是软体仿生机械手实现与环境信息交互

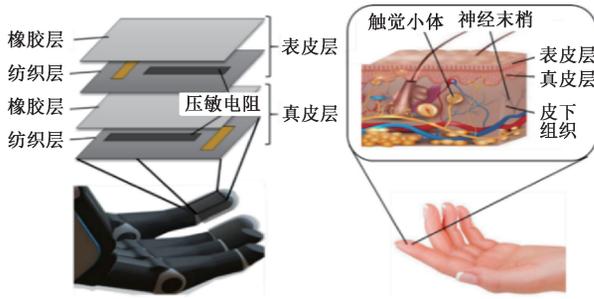


图 1 包裹在橡胶中的导电和压阻纺织品层制作的多仿生电子真皮

Fig. 1 The multilayered e-dermis is made up of conductive and piezoresistive textiles encased in rubber

的必需媒介,根据触觉传感器本身的材料特性和使用范围,触觉传感器通常可分为两类^[26]:第 1 类是硬质金属敏感材料与柔性衬底相结合的触觉传感器,这种传感器最常应用在意外碰撞的检测和复位检测中^[27-28],但此类传感器并不适用于大面积贴敷于机械手上,对于触觉人机交互、医疗康复、加工制造等应用领域不适用,所以目前研究人员大力发展第 2 类触觉传感器即柔性仿生触觉传感器,这类传感器被嵌入、覆盖在某种柔性基底上或者本身就是由柔性材料组成,便于阵列排布。大力发展具有类人皮肤的柔性触觉传感器,贴附在任何形态载体表面感知测量对象的性质特征对于智能机械手发展至关重要。

2.1 硬质金属敏感材料与柔性衬底相结合的触觉传感器

硬质金属敏感材料与柔性衬底相结合制备的触觉传感器,其柔性材料作为衬底可以使触觉传感器柔性可贴附,但由于硬质金属敏感材料的嵌入使其刚性增加,机械手可拉伸性降低,灵活抓取触觉反馈空间分辨率低,常见的敏感材料包括:力传感电阻器(FSR)、压电晶体、金属电极等。在实际应用过程中,为了更好地与软体仿生机械手表面结合,提高触觉传感器的可拉伸性和灵敏度,可对金属敏感材料部分的结构设计做出一些优化^[29-31]。

1) 传统结构的机械手柔性触觉传感器

传统结构的触觉传感器主要是非柔性电极作为敏感元件,这类金属材料没有柔性,仿生机械手指表面曲率大、体积小,一般硬质触觉传感器不易安装和集成,限制了其在机械手抓取反馈任务中的应用,为了实现柔性可贴附功能,采用柔性、可拉伸变形的弹性材料作为衬底和蒙皮,替代硬质壳体。这种柔性基底主要采用有聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)、聚酰亚胺(polyimide, PI)和聚乙烯(polyethylene, PE)、聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)、聚氨酯(polyurethane, PU)、聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)等^[32-34]。

常见结构是将金属敏感材料嵌入到柔性衬底中,多层材料叠加形成“三明治”结构。2016 年 Huang 等^[35]利用金属材料 and 柔性衬底相结合,设计了一种触觉传感器,其结构为垂直多层的,如图 2 所示,多层介质由气隙和 PDMS 组成,该结构可以放置在具有一定曲率的表面上,并且可以实现传感器阵列排布。

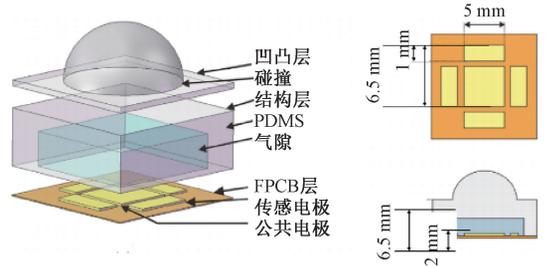


图 2 三轴触觉传感器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the three-axis tactile sensor

2017 年 Wang 等^[36]对传统“三明治”结构进行了优化设计,作为介电层的截棱锥阵列被封装在 PET 之间,顶部层叠了一个 PDMS 凸起,以实现三轴力测量和阵列化,如图 3 所示。此后还有很多研究者研究电容触觉传感阵列,由于导电硅橡胶和 PDMS 具有良好的特性,也常用导电硅橡胶制作电极层,PDMS 制作介质层^[37-39]。

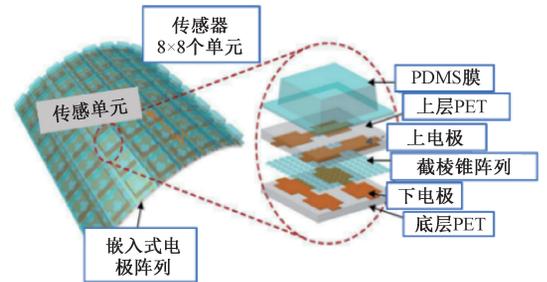


图 3 传感阵列的结构图

Fig. 3 Structure diagram of Sensor Array

在机器人灵巧手控制系统中,分布式接触力的测量非常重要。为此 2019 年 Wang 等^[40]介绍了一种空间分辨率为 3.5 mm 的柔性触觉传感器阵列,它可以很容易地佩戴在机器人手上,用于抓取应用中的分布式三轴接触力传感,如图 4 所示。文中所研制的触觉传感器阵列具有 3x3 个传感单元,每个单元具有五电极图案的设计,并且底部柔性电极制作在聚酯基板上,中间导电橡胶作为传感材料,顶部用 PDMS 薄膜覆盖。

综上,通过传统硬质金属敏感材料与柔性衬底相结合制备的触觉传感器,具有一定的可拉伸变形性,可用在机械手中进行抓取反馈,但其弯曲的曲率以及可拉伸性能依然有限,需要寻求更好的制备方案来提高其拉伸性。同时需要通过优化触觉传感器的形态结构来提高灵敏

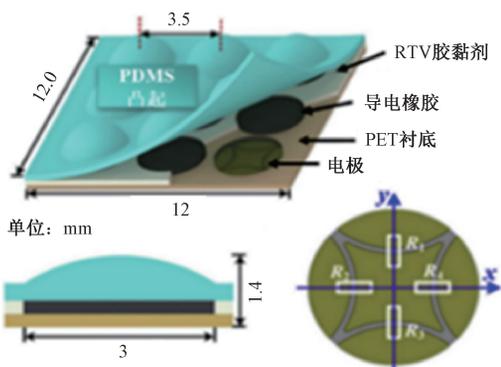


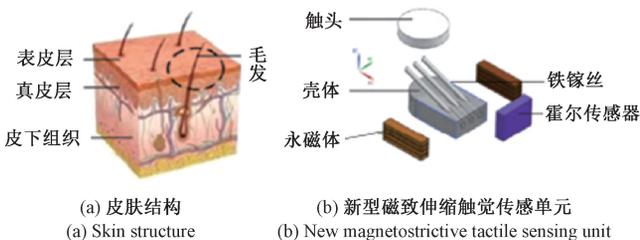
图 4 柔性触觉传感器阵列示意图^[33]

Fig. 4 Flexible tactile sensor array schematic

度、稳定性等性能。

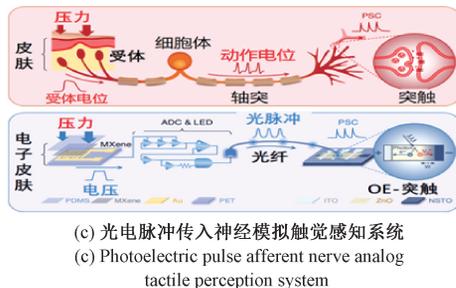
2) 新型仿生结构机械手柔性触觉传感器

结构是影响传感器性能的关键技术之一,上述传统“三明治”结构是为了能够进行三轴力感测,制造的半球形凸点或者锥形凸点将外力分解为 3 个方向的力。自然生物的触觉是获取外界信息的重要途径,为仿生触觉传感器的研究提供了丰富的灵感和实例。通过对不同种类生物的触觉感知器官进行微观尺度的深入研究,揭示生物触觉感知器官的结构,从而研制出仿生触觉传感器。



(a) 皮肤结构
(a) Skin structure

(b) 新型磁致伸缩触觉传感单元
(b) New magnetostrictive tactile sensing unit



(c) 光电脉冲传入神经模拟触觉感知系统
(c) Photoelectric pulse afferent nerve analog tactile perception system

图 5 皮肤结构以及仿皮肤触觉传感单元

Fig. 5 Skin structure and skin-like tactile sensing unit

仿生的第 2 类灵感来源是各类动物,触觉是动物在进化史上发展起来的一种生物感知技能,不同动物的触觉感知系统也大不相同。

昆虫等节肢动物,它们依靠四肢末端的纤毛和裂缝状感受器来获取触觉信息,如图 6(a) 所示。受此启发,许多研究人员将裂纹微结构^[51-54]及其衍生物,如波状波纹微结构^[55]和排列薄膜微结构^[56]应用于触觉传感器。这种微结构可以通过非常简单的工艺实现,并且具有检测范围大的特点。图 6 显示了蜘蛛腿关节中的狭缝和金属薄膜上的机械裂纹^[57]。由这些裂纹连接微结构组成的柔性触觉传感器为灵敏的触觉仿生系统提供了一种低成本、低复杂性的解决方案。另外,根据微小生物的高纵横比纤毛的特点,Pang 等^[58]提出了一种灵活灵敏的高纵

横比的互锁阵列,其由铂涂覆的聚合物纤维微结构构成。通过模拟节肢动物纤毛和裂缝状感受器所研制的仿生触觉传感器具有检测范围大、灵敏度高的优点。但同时,它也存在明显的缺陷:响应滞后,重复性、稳定性差,这使得近两年对此种结构的触觉传感器使用率不高。

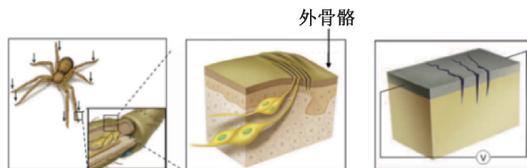


图 6 蜘蛛腿关节中的狭缝和金属薄膜上的机械裂纹
Fig. 6 Slits in spider leg joints and mechanical cracks in metal film

2022 年 Xu 等^[59]模仿海獭手掌中的皮革状颗粒状纹理,设计了一种自供电摩擦电掌状触觉传感器,用于构建水下机器人的触觉感知系统。同年,Liu 等^[60]模拟星鼻鼯鼠的自然感觉融合系统,在无视觉输入的情况下实时采集各种物体的局部地形、刚度和气味。这些新型仿生触觉传感器存在制作困难、触觉信息提取复杂等问题。

仿生的第 3 类灵感来源于植物的微观构。2018 年 Wan 等^[61]通过复制荷叶的图案运用 PDMS 开发了一种高灵敏度的仿生柔性触觉传感器,如图 7(a)所示。其灵敏度约为 1.2 kPa^{-1} ,超低检测限 $< 0.8 \text{ Pa}$,快速响应时间

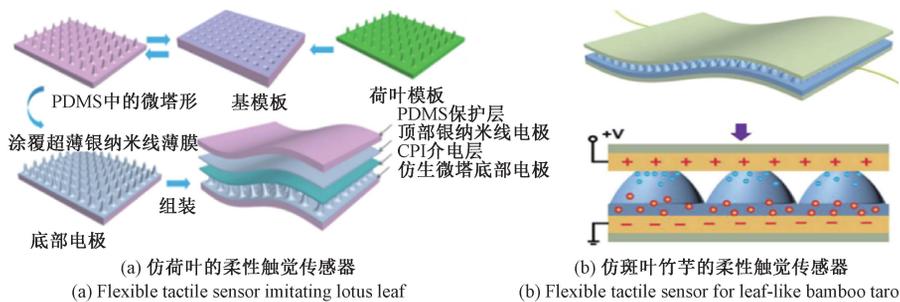


图 7 仿生柔性触觉传感器

Fig. 7 Biomimetic flexible tactile sensor

综上,仿照生物体的触觉感知器官优化人工制造的触觉传感器结构,具有较高的灵敏度和感测范围。但实际应用中,第 1 类结构体积较大且易受电磁干扰,阵列排布需要复杂的电子线路,整体拉伸性能降低,而且会加大制备难度;第 2 类结构体积较小但断裂结构重复性和稳定性较低,实际应用中成本高;第 3 类结构稳定,灵敏度和响应速度都很高,但制备困难且空间分辨率较低,机械手触觉感知定位困难。如何在保证机械手触觉传感器的稳定灵敏的前提下,增加整个系统的柔软可贴附性,是目前面临的挑战之一。

2.2 柔性敏感材料与柔性衬底相结合的触觉传感器

对于机械手柔性触觉传感器的设计,除了上文介绍的硬质金属敏感材料与柔性衬底相结合的方式,还可以采用不同的柔性材料与柔性衬底相结合的方式,在保证稳定灵敏的前提下,制备柔性以及贴附性更高的机械手触觉传感器。目前,研究人员主要利用纳米材料、镓基液态金属以及光纤材料制备柔性触觉传感器,下面分别介绍基于这 3 种材料制备的传感器性能以及应用情况。

1) 纳米材料

近年来,大量导电纳米材料因其优异的导电性、导热性和可重复性而被应用于柔性器件,如碳纳米管^[64-65]、石墨烯^[66-67]、纳米线^[68-69]等,这些纳米级柔性材料可以在不同聚集过程中形成一些特定的框架,获得超薄、超灵敏、可弯曲的微结构。与硅基器件复杂的工艺流程相比,仅

为 36 ms ,同时在十万次接触循环后没有疲劳,性能良好。同年,该实验室又模拟斑叶竹芋制造微结构离子凝胶^[62-63],其夹在上下两电极之间,如图 7(b)上图所示,中夹层结构和受压下的电荷分布如图 7(b)下图所示。该装置的检测下限低至 0.1 Pa ,在低压状态下具有 54.31 kPa^{-1} 的超高灵敏度,在 $0.1 \text{ Pa} \sim 115 \text{ kPa}$ 的宽范围压力下,灵敏度保持在 1 kPa^{-1} 以上。如此高的性能使这类柔性触觉传感器能够检测触觉、肢体运动、心跳和气流,在智能电子和人工智能领域具有较大应用潜力。

由传感材料本身形成的微结构需要更低的制造成本和更简单的工艺流程。同时,全柔性触觉传感器显示出更好的拉伸性能和低检测阈值。

首先,通过在柔性基体中掺杂石墨烯获得的导电聚合物复合材料在传感领域具有巨大的潜在应用^[70]。2017 年 Liu 等^[71]利用热致相分离技术制备了具有超高压缩性的轻质柔性导电多孔石墨烯/热塑性聚氨酯(TPU)泡沫。如图 8 所示,在高达 90% 的应变下导电泡沫表现出良好的可压缩性和稳定的压阻感测信号。Jiang 等^[72]制作了同样的 TPU 泡沫,通过实验验证了压阻触觉传感器具有非常低的密度、出色的可压缩性和高灵敏度。该研究成果不仅可以应用到机械手上,其在健康监测、可穿戴设备和人工智能等新兴应用领域也拥有巨大潜力。

在柔性基底上铺设石墨烯薄膜,石墨烯膜中预先存在的褶皱的松弛可以感测压力信号。2011 年, Wang 等^[73]利用不同预应变的拉伸 PDMS 薄膜接收转移的石墨烯,应变释放后形成纳米级石墨烯周期性屈曲如图 9 所示,石墨烯波纹感知应变变形。2018 年,华中科技大学同样利用褶皱石墨烯薄膜^[74],制备了一种柔性触觉传感器,实现了 28.34 kPa^{-1} 的高灵敏度。采用石墨烯制作的传感器还有其他结构,比如利用片状材料的物理性质,可以通过悬浮预处理,使其利用自重力垂直堆积形成层状微结构^[75-76],在健康监测、灵活接口和机器人感知领域具有巨大的应用潜力。

其次,碳纳米管由于其超高拉伸性能、良好导电性以

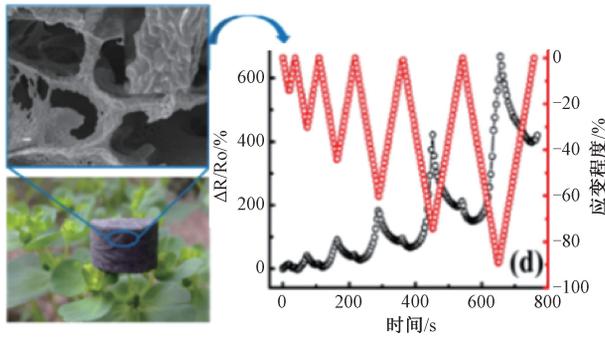


图 8 轻质导电多孔石墨烯/热塑性聚氨酯泡沫结构及不同压力下压阻感测信号^[30]

Fig. 8 Light conductive graphene/thermoplastic polyurethane foams structure and piezoresistive sensing signals under different pressures

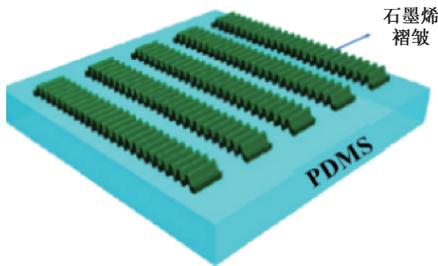


图 9 PDMS 衬底上屈曲石墨烯褶皱带结构

Fig. 9 Fold belt structure of buckled graphene on PDMS substrate

及高灵敏度被广泛应用^[77-80]。2015 年, Ryu 等^[81]通过拉伸生长在柔性基底上的碳纳米管纤维制成超高可拉伸和可穿戴设备, 如图 10 所示。弯曲是机械手常见的动作, 全向弯曲传感器对于多自由度的机械手运动非常有用。2018 年, Chen 等^[82]将聚氨酯海绵条浸入碳纳米管油墨中, 聚氨酯海绵由内向外被碳纳米管充分包覆, 再嵌入到柔性基底上, 如图 11 分别为碳纳米管海绵的扫描电镜图像和传感器弯曲结构示意图。将该结构安装到机械手上可以独立检测全方位弯曲和压力。

为提高重复拉伸下的耐久性, 纳米线柔性传感器因其柔性可编织的特点而备受青睐^[83]。2019 年, Ling 等^[84]把垂直排列具有针孔结构的直立金纳米线嵌入 PDMS 中, 如图 12 所示, 粘合强度高不易脱落, 重复性得到显著增强。2018 年 Wang 等^[85]制备了一种自供电、高度可拉伸和透明的银纳米线触觉传感器。如图 13 所示, 阵列排布的传感器在高应变下工作良好, 响应时间为 70 ms。

综上, 由于导电纳米材料具有非常好的柔性, 可以很好地应用在机械手触觉感知领域, 而且纳米材料中金属含量远低于传统金属电极, 具有低成本、环保节能的突出

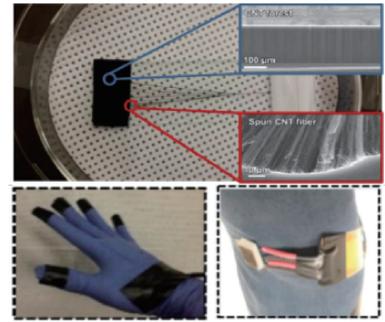


图 10 拉伸生长在柔性基底上的碳纳米管纤维扫描电镜图像以及制成的可穿戴设备

Fig. 10 Scanning electron microscope image of carbon nanotube fibers stretched on a flexible substrate and a wearable device

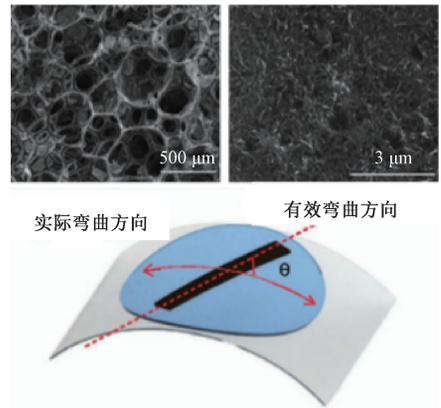


图 11 碳纳米管海绵的扫描电镜图像以及传感器弯曲结构

Fig. 11 Sem image of carbon nanotube sponge and schematic diagram of sensor bending structure

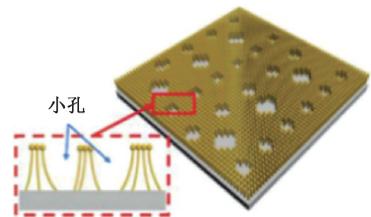


图 12 PDMS 上嵌入直立金纳米线示意图

Fig. 12 Schematic diagram of upright gold nanowires embedded in PDMS

优势, 同时, 纳米材料的导电率低, 阻值大, 品质因数低, 具有较大的带宽, 有利于触觉感知领域的应用。在反复的机械变形下, 金属导电材料易于从弹性基板上剥离, 这严重影响了器件的耐久性, 而纳米材料的附着性较高。然而, 现有制备方法的不完善, 不同的方法可能导致制备的纳米材料性质存在明显差异, 且不同生产批次之间的

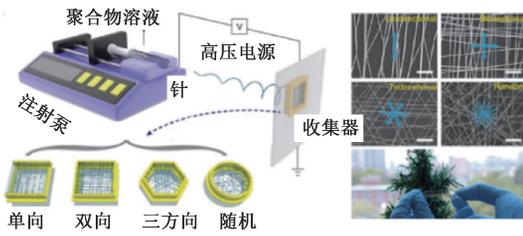


图 13 银纳米线扫描电镜图像以及制造的可拉伸透明银纳米线电极的图片

Fig. 13 Scanning electron microscope image of silver nanowire and image of fabricated stretchable transparent silver nanowire electrode

一致性和高密度集成也是应用这种微结构制造触觉传感器过程中的挑战。

2) 光纤聚合物材料

随着光纤制备技术的发展,光纤的传输性能越来越优异,在损耗方面已经接近理论阈值,鉴于其优良的性能,各国都开始加大光纤传感器的研发力度。

光纤传感是基于不同折射率介质之间的光学反射。传统的光纤触觉传感器由红外发光二极管阵列和光电探测器组成,这种强度调制型传感器光强与压力的大小成

正比。光纤传感器也可以对剪切力敏感,例如 Yussof 等^[86]为机械手的指尖开发了一种光学三轴触觉传感器,如图 14 所示,该传感器由 41 个硅橡胶制成的传感元件、1 个光源、1 个光纤镜和 1 个电荷耦合器件摄像机组成。

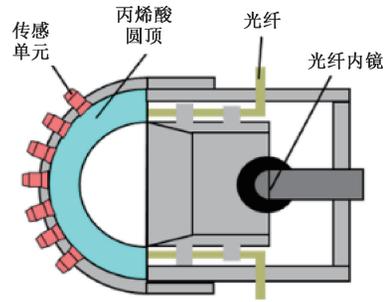


图 14 光学三轴触觉传感器

Fig. 14 Optical three-axis tactile sensor

根据光在光纤中被调制的类型来分类,从而形成多种光纤传感器,有强度调制型、相位调制型、频率调制型、波长调制型和偏振态调制型等,对于软体机械手光纤触觉传感器常用方式有光纤传输光强度调制方法、光纤布拉格光栅的波长调制方法。表 1 为不同传感机理的光纤类触觉传感器的优缺点。

表 1 光纤类触觉传感器不同传感机理的优缺点

Table 1 The advantages and disadvantages of optical tactile sensors with different sensing mechanisms

传感技术	优点	缺点
光强调制型	结构简单、频率响应高、灵敏度高、动态范围大	易受干扰、精度低、空间分辨率低、可靠性低
相位调制型	频率响应高、灵敏度高、动态范围大、精度高、可靠性高	易受干扰、空间分辨率低
波长调制型	抗干扰能力强、波长可编码、复用能力强	波长的解调技术复杂、空间分辨率低、精度低

基于强度的光纤触觉传感器是压力使被测光发生变化,检测反射或透射光的功率变化。这类传感器是研究最早、原理最简单、应用最广泛的一类,然而,由于光源和传光系统中的功率波动,这种传感器在实际应用时有限制^[50]。伦敦大学国王学院的 Xie 等^[87-88]为了将光纤触觉传感器应用到微创手术的操作手上,开发了一种 3×3 触觉光纤传感器,能够测量施加的法向力,如图 15 所示,可以对外部触觉和滑觉等参数进行检测。

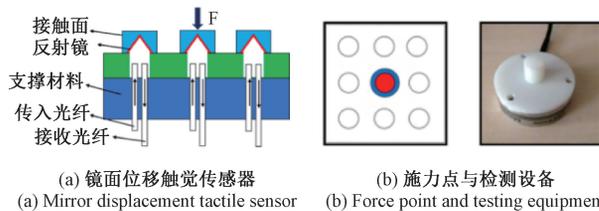


图 15 光纤触觉感知阵列^[49]

Fig. 15 Fiber optic tactile sensing array

觉传感的新型光纤触觉传感器。传感元件是锥形光纤,锥形光纤嵌入到 PDMS-金纳米复合材料中,如图 16(a) 所示,这种结构空间分辨率不高只能单纯检测压力值。而 2015 年瑞士联邦材料科学实验室的 Spano 等^[90]将纯光纤嵌入 PDMS 的纳米复合材料中,制成了仿生机器人皮肤,结构如图 16(b) 所示,这种结构相比于锥形光纤重复性更高,对压力检测也具有高灵敏度,但不能精确定位。2016 年, Yamazaki 等^[91]把纤芯直径为 5 μm 的光纤两端与纤芯直径为 9 μm 的传输光纤熔接制作出半球触觉传感器,用于在小接触区域内进行纹理和硬度检测,该传感器具有对软弯曲的高灵敏度、对温度波动的抗扰性优点。

波长调制型光纤触觉传感器采用光纤光栅作为敏感元件,压力改变光纤光栅中心波长实现传感,这种传感器抗干扰能力强、波长可编码、复用能力强且为本征型传感器,不同生产批次一致性也高,可以用在多种领域复杂环境下,但光纤光栅波长的解调技术较复杂,传感系统的分辨率和精度受到一定的限制^[92-93]。

同年 Athanassiou 等^[89]提出了一种适用于机器人触

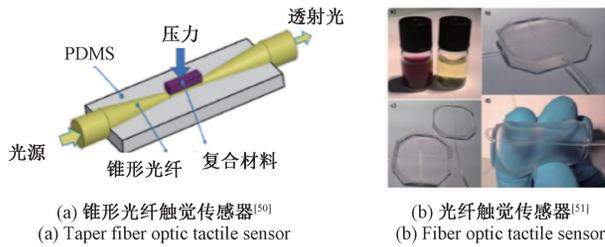


图 16 新型光纤触觉传感器

Fig. 16 New optical fiber tactile sensor

根据沿光栅轴向分布的折射率变化方式可以分为均匀光栅和非均匀光栅,常用的布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)是一种纤芯的折射率变化幅度和周期均沿光纤轴向保持恒定不变的光纤光栅,其具有多路复用能力,尽管可复用的 FBG 数量有限,但基于 FBG 的传感器能够以准分布式配置实现多点监控^[94-99]。基于这种特点 2016 年钱牧云等^[94]提出了一种基于光纤光栅的二维分布式传感阵列的触觉传感器,该方法采用两根平行放置和一根倾斜放置的光纤光栅组成传感单元,利用弹性材料封装保护传感器并增强光纤光栅对压力的灵敏度。Qian 等^[95]在 2018 年还提出了一种升级版光纤布拉格光栅触觉传感器,使机械手指能够轻柔地抓取物体,如图 17(a)所示,传感器结构简单,灵敏度高,能够可靠地检测目标物体的接触状态。2019 年 Sosama 等^[96]验证了把 FBG 嵌入硅树脂中测量物体接触面大小的可能性,证实了光纤光栅与柔性材料具有良好的融合性。Massari 等^[97]提出了一种柔性大面积触觉传感方法,可通过模块化贴片覆盖机器人全身,如图 17(b)所示。仿生皮肤由柔软的聚合物基质组成,嵌入光纤布拉格光栅传感器,具有大范围、重叠的触觉感知功能,可以判断接触力大小和皮肤表面的定位。

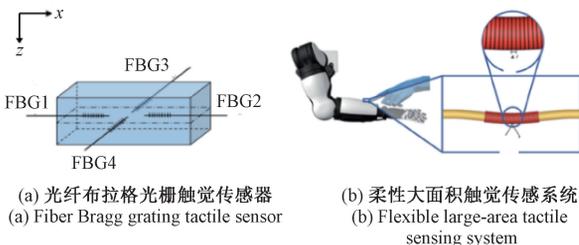


图 17 布拉格光栅触觉传感器

Fig. 17 Bragg grating tactile sensor

除了上述常用的 FBG,还有一些非均匀光纤光栅,即纤芯折射率变化幅度或周期沿光纤轴向变化的光纤光栅,如啁啾光栅、切趾光栅、相移光栅和取样光栅,这些光栅根据其特性也应用到不同领域。其中长啁啾光纤光栅(long-chirped fiber Bragg grating, LCFBG)是一种具有特殊

结构的光纤光栅,其周期沿光栅轴向变化,栅区长度长。与传统 FBG 相比,具有反射谱带宽、轴向与横向均有连续光谱感应特征的优势,符合仿生机机械手触觉感知的物理检测特性。2017 年裴丽等^[100]验证了啁啾相移光纤光栅的中心波长对应变点和应变量的波长敏感性,实现应变点精确定位的传感。同年,北京信息科技大学^[101]也验证了基于长啁啾光纤光栅的分布式位置与压力双参量传感器可实现多点应力与定位多参量同时监测,因此非常适用于软体机械手柔性触觉感知的物理检测。同时研究人员为解决微创手术软体机械手末端触觉感知的实际需求,已经验证了基于光纤光栅的微创软体机器人末端三维力的测量方法的可行性^[102],并在光纤光栅埋入柔性机器人和柔性变形机翼的重复实验中表现出良好的一致性^[103]。

综上,光纤作为敏感材料能避免电磁干扰,与柔性衬底结合相比于金属材料具有比较高的柔性、融合性和拉伸性,传递效率较高,但基于强度调制的光纤触觉传感器对精度要求较高,批量生产的结构一致性和高密度集成是应用推广过程中的挑战。基于波长调制的光纤触觉传感器敏感材料加工工艺成熟,但单个布拉格光栅空间分辨率不高不能精确定位,目前在研究阵列排布 FBG 或者采用 LCFBG 来解决这一问题,并且基于波长调制的光纤触觉传感器解调工艺复杂,对精度要求较高,这是限制该类型传感器发展的主要问题。

3 触觉数据类型及信息处理

触觉传感器根据传输信号的不同可以分为电学式和光学式。电学式触觉传感器根据不同传感机理还可以分为压阻式、电容式、压电式、热电式、电磁式等,但常用的触觉测量方式主要是以压阻式、压电式、电容式这几类。在电容式、压电式、压阻式触觉传感器中,可以直接从每个传感模块获取数据,这类传感器往往需要大量的导线,或者通过使用多路复用电路。根据光在光纤中被调制的类型,光学式触觉传感器可以分为强度调制型、相位调制型、频率调制型、波长调制型和偏振态调制型等,对于机械手光纤触觉传感器常用的调制方式为光强度调制方法、波长调制型这两类。触觉传感器的传感机理不同,采集的触觉信号类型也不同。如图 18 为各触觉传感信号类型,图 18(a)是触觉传感阵列的二维压力分布,其中传感阵列分布于 xy 平面上,压力沿 z 轴变化^[88];图 18(b)是触觉的动态触觉信号^[59];图 18(c)是光强检测信号,时刻随强度的分布^[53];图 18(d)是基于光纤光栅的压触觉感知皮肤系统所采集到的光谱波长检测信号,随压力增加检测波长漂移^[97]。

以上是常用的触觉传感器采集到的触觉信号类型。

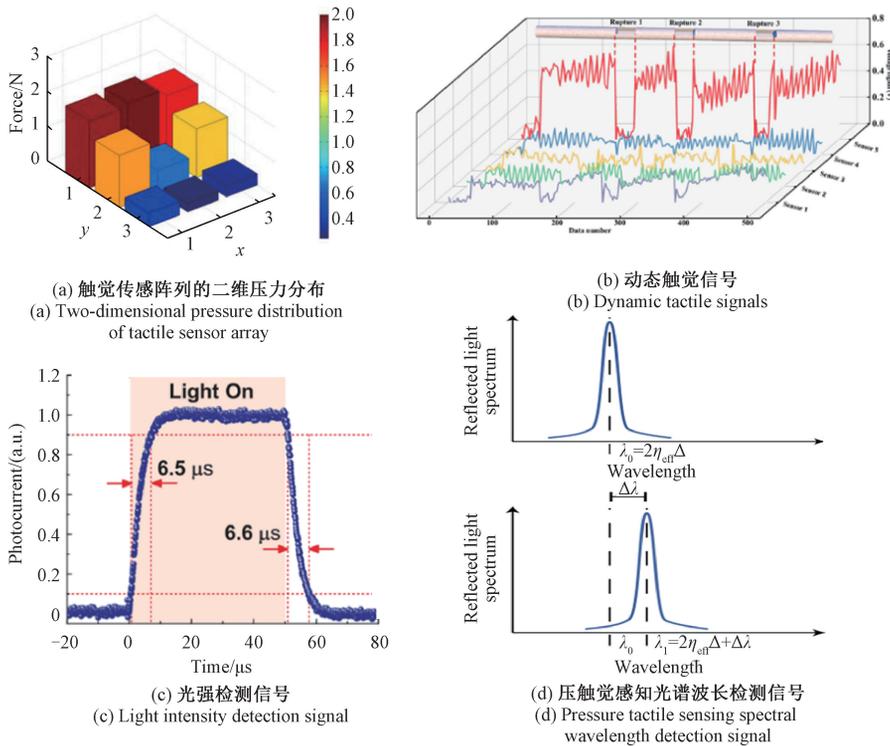


图 18 触觉传感信号类型

Fig. 18 Tactile sensor signal types

将触觉信号引入机械手控制系统,对于机械手智能控制、非结构化空间环境感知尤为重要。机械手系统的触觉信息处理分为信号转换、信号提取和控制这 3 个层次。首先将各种形式的触觉信号转换成电信号,并对信号进行预处理,然后对转换后的输入信号进行信息提取、融合,获得交互对象的属性信息,最后将信息输出进行控制决策,使机器人执行相应的操作。

4 存在问题及发展

机械手触觉传感器经过近 50 年的发展,已经取得了一系列的成果,各种传感方式都取得了不小的突破,并显

示出了广阔的应用前景,但为了追求结构更精巧、性能更优良、品质更高的触觉传感器,其研究和开发依然需要进行。针对本文中给出的几种机械手柔性触觉传感器的制备方法,表 2 所示为几种典型的柔性触觉传感器的重要参数及其性能分析。表 2 中可以看出金属敏感材料“三明治”结构触觉传感器探测范围广,其中压阻式传感器的灵敏度较高;金属敏感材料仿生结构触觉传感器响应速度快、灵敏度高但探测范围较小;纳米材料探测范围越大其灵敏度越低,响应速度也较快;光纤材料触觉传感器空间分辨率低,波长调制型传感器轴向力探测范围广,剪切力探测范围小。接下来,从不同的材料制备方法来分析机械手柔性触觉传感器中所存在的问题。

表 2 几种典型的柔性触觉传感器的重要参数

Table 2 Several important parameters of typical flexible tactile sensors

柔性策略	传感技术	灵敏度(最高时)	空间分辨率	探测范围	响应速度	参考文献
金属敏感材料“三明治”结构	压阻式	$X/Y/Z; 0.471 \text{ V/N}, 0.466 \text{ V/N}, 0.201 \text{ V/N}$	3.5 mm	0~50 N	-	[40]
金属敏感材料“三明治”结构	电容式	$X/Y/Z; 0.005 \text{ 3 N}^{-1}, 0.006 \text{ 0 N}^{-1}, 0.009 \text{ 5 N}^{-1}$	-	0~10 N	-	[35]
金属敏感材料仿生结构	磁致伸缩	115 mV/N	-	0~3 N	-	[48]
金属敏感材料仿生结构	电容式	1.2 kPa^{-1}	-	>0.9 Pa	36 ms	[86]
纳米材料	压阻式	28.34 kPa^{-1}	-	>2.24 Pa	-	[74]
纳米材料	压阻式	$0.042 \sim 0.152 \text{ kPa}^{-1}$ 可调	-	0~27 kPa	96 ms	[70]
光纤材料	波长调制	剪切: 0.01 nm/N 伸长: 16.3 nm/N	-	剪切力: $0 \sim 0.348 \text{ N}$	-	[67]
光纤材料	波长调制	0.16 nm/N	25 mm	0~7 N	-	[93]

对于硬质金属材料和柔性蒙皮相结合制作的柔性触觉传感器存在如下问题:

1) 采用多层材料叠加形成“三明治”设计的触觉传感阵列的拉伸性很低,可弯曲曲率也不高,不适合在表面积大、体积小、高曲率的机械手表面贴附。

2) 将传统结构进行仿生优化设计具有较高灵敏度,但稳定性较优化前有所降低,大尺度的拉伸性能也并没有提高,而且还增大了制备难度,如何设计触觉传感器在稳定灵敏的前提下,增加整个系统的柔软可贴附性是面临的主要问题。

目前发展较成熟的是机械手触觉中的力觉,感觉力和进行力的反馈已经能够较好地应用于医疗机器人和工业生产机器人。新研究出来的类似人皮肤的材料已经具有较高的柔弹性,而嵌入柔性触觉传感器的触觉皮肤如何具有较高感知功能是新的研究热点。

对于柔性材料和柔性蒙皮相结合制作的柔性触觉传感器存在如下问题:

1) 利用纳米材料制备的触觉传感器很容易在机械手弯曲拉伸运动下发生较大机械变形,数据读取不准确。纳米材料的导电性差,且稳定可重复使用的纳米材料的制备方法有待改善。

2) 利用光纤制作触觉传感器,其具有良好的灵敏度、嵌入性、易柔性弯曲、高重复性和抗电磁干扰能力,而缺点是空间分辨率低、不抗剪切力、高功耗和计算耗时长。

柔性触觉传感器的研究展望如下:

1) 结构方面。仿生结构的柔性触觉传感器具有较高的灵敏度和感测范围,将传统结构进行仿生优化是一个研究方向。此外,不同结构的创造性组合通常可以发挥更好的作用^[104],从而使触觉传感器的灵敏度、线性度和迟滞更为平衡,这对工艺组合提出了更高的要求。在柔性触觉传感器向阵列化和高空间分辨率方向发展的过程中,在保持高密度传感单元之间良好和可靠的一致性、与现有 MEMS 技术兼容以实现低成本商业化批量生产等方面仍然面临着巨大的挑战。

2) 材料方面。进一步针对不同材料展开具体研究。对于纳米材料,通过不同类型纳米材料的组合可能会提高组合材料的导电性和柔性,从而增强触觉传感器的性能。优化纳米材料制备方法,提高所制备纳米材料的性能一致性。对于光纤材料,目前出现的制备技术还不够成熟,批量生产的结构一致性和高密度集成并不能实现,把阵列排布的光纤布拉格光栅用于高空间分辨率下的触觉感知其分辨率不高,根据调查研究,采用特种光纤光栅代替光纤布拉格光栅是未来的一个研究方向。

5 结 论

基于机械手触觉传感器的设计需要一种更加新型有

效的结构设计及材料制备方法来面对由较大自由度弯曲变形引起数据准确性降低的挑战,并且触觉不仅要感受到压力还要感受到湿度、粘度、表面粗糙度等综合信息,更具有挑战性。本文综述了柔性触觉传感器在软体仿生机械手领域的研究现状以及发展趋势,从两类不同的材料选取出发,分别讨论了不同结构的柔性触觉传感器的设计方法,及其性能和应用。通过分析各种类型传感器的特点,最后给出了这几种传感器存在的问题和发展方向。当前,机械手触觉传感器正朝着柔性、轻巧、多功能集成、多模态、低能耗、大面积阵列、仿生的方向发展。

参考文献

- [1] BHATTACHARJEE T, CLEVER H M, WADE J, et al. Multimodal tactile perception of objects in a real home[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(3): 2523-2530.
- [2] 陆熊, 陈晓丽, 孙浩浩, 等. 面向自然人机交互的力触觉再现方法综述[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(10): 2391-2399.
LU X, CHEN X L, SUN H H, et al. Haptic rendering methods for natural human-computer interaction: A review[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(10): 2391-2399.
- [3] RUS D, TOLLEY M T. Design, fabrication and control of soft robots[J]. Nature, 2015, 521(7553): 467-475.
- [4] WANG L, HIDA F. Deformation in soft-matter robotics: A categorization and quantitative characterization[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2015, 22(3): 125-139.
- [5] 赵海文, 王曼菲, 刘吉晓, 等. 基于双电层电容的柔性触觉传感器机理研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 25-32.
ZHAO H W, WANG M F, LIU J X, et al. Mechanism study of flexible tactile sensor based on electrical double-layer capacitor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2): 25-32.
- [6] 曹经錡, 康健炜, 袁卫锋. 柔性压电复合材料薄膜无线应变传感器研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(6): 184-190.
CAO J Q, KANG J W, YUAN W F. Research on wireless strain sensor using flexible piezoelectric composite film[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(6): 184-190.
- [7] ELANGO N, FAUDZI A. A review article: Investigations on soft materials for soft robot manipulations[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(5-8): 1027-1037.
- [8] HUGHES J, CULHA U, GIARDINA F, et al. Soft

- manipulators and grippers: A review [J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2016, 3: 69.
- [9] AHANAT K, JUAN A C R, VERONIQUE P. Tactile sensing in dexterous robot hands-Review[J]. *Robotics & Autonomous Systems*, 2015, 74: 195-220.
- [10] MARTINEZ-HERNANDEZ U, METTA G, DODD T J, et al. Active contour following to explore object shape with robot touch [C]. 2013 World Haptics Conference (WHC). IEEE, 2013: 341-346.
- [11] GOGER D, GORGES N, WORN H. Tactile sensing for an anthropomorphic robotic hand; Hardware and signal processing [C]. 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2009: 895-901.
- [12] DANG H, ALLEN P. Stable grasping under pose uncertainty using tactile feedback [J]. *Autonomous Robots*, 2014, 36(4): 309-330.
- [13] LIU H, SONG X, BIMBO J, et al. Intelligent Fingertip Sensing for Contact Information Identification [M]. *Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots I*. Springer, London, 2012: 599-608.
- [14] SONG X, LIU H, ALTHOEFER K, et al. Efficient break-away friction ratio and slip prediction based on haptic surface exploration [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2013, 30(1): 203-219.
- [15] NGUYEN K C, PERDEREAU V. Fingertip force control based on max torque adjustment for dexterous manipulation of an anthropomorphic hand [C]. 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2013: 3557-3563.
- [16] HARMON LEON D. Automated tactile sensing[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 1982, 1(2): 3-32.
- [17] DAHIYA R S, METTA G, VALLE M, et al. Tactile sensing-from humans to humanoids [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2009, 26(1): 1-20.
- [18] TIWANA M I, REDMOND S J, LOVELL N H. A review of tactile sensing technologies with applications in biomedical engineering [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 179: 17-31.
- [19] FRANCOMANO M T, ACCOTO D, GUGLIELMELLI E. Artificial sense of slip-A review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(7): 2489-2498.
- [20] DAHIYA R S, MITTENDORFER P, VALLE M, et al. Directions toward effective utilization of tactile skin: A review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(11): 4121-4138.
- [21] WETTELS N, FISHEL J A, LOEB G E. Multimodal tactile sensor[J]. *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 2014, 95:405-429.
- [22] 曹建国, 周建辉, 缪存孝, 等. 电子皮肤触觉传感器研究进展与发展趋势 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(1): 1-13.
- CAO J G, ZHOU J H, MIU C X, et al. Research progress and development strategy on tactile sensors for e-skin [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(1): 1-13.
- [23] 赵江涛, 张明. 三维力触觉传感器滑觉识别融合的信息提取分析 [J]. *电子测量技术*, 2019, 42(11): 79-82.
- ZHAO J T, ZHANG M. Detailed information extraction and analysis of three-dimensional force and touch sensor sliding recognition and fusion [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2019, 42(11): 79-82.
- [24] OSBORN L E, DRAGOMIR A, BETTHAUSER J L, et al. Prosthesis with neuromorphic multilayered e-dermis perceives touch and pain [J]. *Science Robotics*, 2018, 3(19): eaat3818.
- [25] LIU J, ZHU C X, LEE T W, et al. A bioinspired flexible organic artificial afferent nerve [J]. *Science*, 2018, 360(6392): 998-1003.
- [26] ARGALL B D, BILLARD A G. A survey of tactile human-robot interactions [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, 58(10): 1159-1176.
- [27] IWATE H, HOSHINO H, MORITA T, et al. Human-humanoid physical interaction realizing force following and task fulfillment [C]. *Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000) (Cat. No. 00CH37113)*. IEEE, 2000, 1: 522-527.
- [28] FRIGOLA M, CASALS A, AMAT J. Human-robot interaction based on a sensitive bumper skin [C]. 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2006: 283-287.
- [29] STASSI S, CAUDA V, CANAVESE G, et al. Flexible tactile sensing based on piezoresistive composites: A review [J]. *Sensors*, 2014, 14(3): 5296-5332.
- [30] ALIN D, GERT K, ARNE B, et al. Design of a flexible tactile sensor for classification of rigid and deformable objects [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2014, 62(1): 3-15.
- [31] KOIVA R, ZENKER M, SCHÜRMAN C, et al. A highly sensitive 3D-shaped tactile sensor [C]. 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. IEEE, 2013: 1084-1089.
- [32] DEUTZ D B, MASCARENHAS N T, SCHELEN J B J, et al. Flexible piezoelectric touch sensor by alignment of

- lead-free alkaline niobate microcubes in PDMS [J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(24): 1700728.
- [33] GONÇALVES S, SERRADO-NUNES J, OLIVEIRA J, et al. Environmentally friendly printable piezoelectric inks and their application in the development of all-printed touch screens [J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2019, 1(8): 1678-1687.
- [34] LIN W K, WANG B, PENG G X, et al. Skin-inspired piezoelectric tactile sensor array with crosstalk-free row+column electrodes for spatiotemporally distinguishing diverse stimuli [J]. *Advanced Science*, 2021, 8(11): 2002817.
- [35] HUANG Y, YUAN H, KAN W, et al. A flexible three-axial capacitive tactile sensor with multilayered dielectric for artificial skin applications [J]. *Microsystem Technologies*, 2016:1-6.
- [36] WANG Y C, LIANG G H, MEI D Q, et al. Flexible tactile sensor array mounted on the curved surface: Analytical modeling and experimental validation [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2017, 26(5):1002-1011.
- [37] GAO M, XIA Z D, WANG X L, et al. Fabrication of a flexible capacitor sensor with surface-fabric-structured conductive silicon rubber[J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2019, 295: 141-150.
- [38] WANG X L, XIA Z D, ZHAO C, et al. Microstructured flexible capacitive sensor with high sensitivity based on carbon fiber-filled conductive silicon rubber[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 312:112147.
- [39] HSIEH M L, YEH S K, LEE J H, et al. CMOS-MEMS capacitive tactile sensor with vertically integrated sensing electrode array for sensitivity enhancement [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 317: 112350.
- [40] WANG Y C, WU X, MEI D Q, et al. Flexible tactile sensor array for distributed tactile sensing and slip detection in robotic hand grasping [J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2019, 297:111512.
- [41] ZHANG C, ZHANG J, CHEN D, et al. Crack-based and hair-like sensors inspired from arthropods: A review[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2020, 17(5): 867-898.
- [42] HUA Q, SUN J, LIU H, et al. Skin-inspired highly stretchable and conformable matrix networks for multifunctional sensing [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1-11.
- [43] WENG L, XIE G, ZHANG B, et al. Magnetostrictive tactile sensor array for force and stiffness detection[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, 513: 167068.
- [44] ZHANG B, WANG B, LI Y, et al. Magnetostrictive tactile sensor array for object recognition [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2019, 55(7): 1-7.
- [45] MELZER M, KALTENBRUNNER M, MAKAROV D, et al. Imperceptible magnetoelectronics [J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 1-8.
- [46] MELZER M, MÖNCH J I, MAKAROV D, et al. Wearable magnetic field sensors for flexible electronics[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(7): 1274-1280.
- [47] BERMÚDEZ G S C, KARNAUSHENKO D D, KARNAUSHENKO D, et al. Magneto-sensitive e-skins with directional perception for augmented reality [J]. *CURRENT FORESTRY REPORTS*, 2018, 4(1): eao2623.
- [48] 翁玲, 高绍阳, 王博文, 等. 用于检测压力与刚度的柔性磁致伸缩触觉传感器阵列[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(9):110-120.
- WENG L, GAO SH Y, WANG B W, et al. Flexible magnetostrictive tactile sensor array for pressure and stiffness detection [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(9):110-120.
- [49] 王亮, 王博文, 翁玲, 等. 磁致伸缩触觉传感器阵列及其在机械手抓取物体中的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(8): 91-98.
- WANG L, WANG B W, WENG L, et al. Magnetostrictive tactile sensor array and its application in grasping objects by manipulator[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(8): 91-98.
- [50] TAN H, TAO Q, PANDE I, et al. Tactile sensory coding and learning with bio-inspired optoelectronic spiking afferent nerves [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1):1369.
- [51] PARK B, LEE S, CHOI H, et al. A semi-permanent and durable nanoscale-crack-based sensor by on-demand healing[J]. *Nanoscale*, 2018, 10(9): 4354-4360.
- [52] KIM B C, MATSUOKA T, MORAES C, et al. Guided fracture of films on soft substrates to create micro/nano-feature arrays with controlled periodicity [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3(1): 1-6.
- [53] OH N, KIM B H, CHO S Y, et al. Double-heterojunction nanorod light-responsive LEDs for display applications[J]. *Science*, 2017, 355(6325): 616-619.
- [54] VANDEPARRE H, LIU Q, MINEV I R, et al. Localization of folds and cracks in thin metal films coated on flexible elastomer foams [J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(22): 3117-3121.

- [55] NAM K H, PARK I H, KO S H. Patterning by controlled cracking [J]. *Nature*, 2012, 485 (7397): 221-224.
- [56] YAMADA T, HAYAMIZU Y, YAMAMOTO Y, et al. A stretchable carbon nanotube strain sensor for human-motion detection [J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, 6(5): 296-301.
- [57] KANG D, PIKHITSA P V, CHOI Y W, et al. Ultrasensitive mechanical crack-based sensor inspired by the spider sensory system [J]. *Nature*, 2014, 516(7530): 222-226.
- [58] PANG C, LEE G Y, KIM T, et al. A flexible and highly sensitive strain-gauge sensor using reversible interlocking of nanofibres [J]. *Nature Materials*, 2012, 11(9): 795-801.
- [59] XU P, LIU J, LIU X, et al. A bio-inspired and self-powered triboelectric tactile sensor for underwater vehicle perception [J]. *npj Flexible Electronics*, 2022, 6(1): 1-10.
- [60] LIU M, ZHANG Y, WANG J, et al. A star-nose-like tactile-olfactory bionic sensing array for robust object recognition in non-visual environments [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 79-79.
- [61] WAN Y B, QIU Z G, HONG Y, et al. A highly sensitive flexible capacitive tactile sensor with sparse and high-aspect-ratio microstructures [J]. *Advanced Electronic Materials*, 2018, 4(4): 1700586.
- [62] QIU Z, WAN Y, ZHOU W, et al. Ionic skin with biomimetic dielectric layer templated from calathea zebrina leaf [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(37): 1802343.
- [63] KOCH K, BARTHOLOTT W. Superhydrophobic and superhydrophilic plant surfaces: An inspiration for biomimetic materials [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2009, 367(1893): 1487-1509.
- [64] LIN L, LIU S, ZHANG Q, et al. Towards tunable sensitivity of electrical property to strain for conductive polymer composites based on thermoplastic elastomer [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(12): 5815-5824.
- [65] LIU H, GAO J, HUANG W, et al. Electrically conductive strain sensing polyurethane nanocomposites with synergistic carbon nanotubes and graphene bifillers [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(26): 12977-12989.
- [66] BOLAND C S, KHAN U, BACKES C, et al. Sensitive, high-strain, high-rate bodily motion sensors based on graphene-rubber composites [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(9): 8819-8830.
- [67] LIN Y, DONG X, LIU S, et al. Graphene-elastomer composites with segregated nanostructured network for liquid and strain sensing application [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(36): 24143-24151.
- [68] HWANG B U, LEE J H, TRUNG T Q, et al. Transparent stretchable self-powered patchable sensor platform with ultrasensitive recognition of human activities [J]. *ACS Nano*, 2015, 9(9): 8801-8810.
- [69] GONG S, LAI D T H, WANG Y, et al. Tattolike polyaniline microparticle-doped gold nanowire patches as highly durable wearable sensors [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(35): 19700-19708.
- [70] GE G, CAI Y, DONG Q, et al. A flexible pressure sensor based on rGO/polyaniline wrapped sponge with tunable sensitivity for human motion detection [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(21): 10033-10040.
- [71] LIU H, DONG M, HUANG W, et al. Lightweight conductive graphene/thermoplastic polyurethane foams with ultrahigh compressibility for piezoresistive sensing [J]. *Journal of Materials Chemistry C Materials for Optical and Electronic Devices*, 2017, 5(1): 73-83.
- [72] JIANG H E, DONG D D, MA J Z, et al. Lightweight, compressible and electrically conductive polyurethane sponges coated with synergistic multiwalled carbon nanotubes and graphene for piezoresistive sensors [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(15): 7116-7126.
- [73] WANG Y, YANG R, SHI Z, et al. Super-elastic graphene ripples for flexible strain sensors [J]. *ACS Nano*, 2011, 5(5): 3645-3650.
- [74] LIU W, LIU N, YUE Y, et al. Piezoresistive pressure sensor based on synergistic inner connect polyvinyl alcohol nanowires/wrinkled graphene film [J]. *Small*, 2018, 14(15): 1-8.
- [75] WAN S, BI H, ZHOU Y, et al. Graphene oxide as high-performance dielectric materials for capacitive pressure sensors [J]. *Carbon*, 2017, 114: 209-216.
- [76] CAI Y, SHEN J, GE G, et al. Stretchable Ti₃C₂T_x MXene/carbon nanotube composite based strain sensor with ultrahigh sensitivity and tunable sensing range [J]. *ACS Nano*, 2018, 12(1): 56-62.
- [77] LIPOMI D J, VOSGUERITCHIAN M, TEE B C K, et al. Skin-like pressure and strain sensors based on transparent elastic films of carbon nanotubes [J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, 6(12): 788-792.
- [78] PARK S, KIM H, VOSGUERITCHIAN M, et al.

- Stretchable energy-harvesting tactile electronic skin capable of differentiating multiple mechanical stimuli modes [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26 (43): 7324-7332.
- [79] CHOU H H, NGUYEN A, CHORTOS A, et al. A chameleon-inspired stretchable electronic skin with interactive colour changing controlled by tactile sensing[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 1-10.
- [80] WANG X, LI T, ADAMS J, et al. Transparent, stretchable, carbon-nanotube-inlaid conductors enabled by standard replication technology for capacitive pressure, strain and touch sensors [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013, 1(11): 3580-3586.
- [81] RYU S, LEE P, CHOU J B, et al. Extremely elastic wearable carbon nanotube fiber strain sensor for monitoring of human motion [J]. *Acs Nano*, 2015, 9(6): 5929-5936.
- [82] CHEN H, SU Z, SONG Y, et al. Omnidirectional bending and pressure sensor based on stretchable CNT-PU sponge [J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(3): 1604434.
- [83] SARWAR M S, DOBASHI Y, PRESTON C, et al. Bend, stretch, and touch: Locating a finger on an actively deformed transparent sensor array [J]. *Science Advances*, 2017, 3(3): e1602200.
- [84] LING Y, GONG S, ZHAI Q, et al. Embedding pinhole vertical gold nanowire electronic skins for braille recognition [J]. *Small*, 2019, 15(13): e1804853.
- [85] WANG X, ZHANG Y, ZHANG X, et al. A highly stretchable transparent self-powered triboelectric tactile sensor with metallized nanofibers for wearable electronics [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(12): 1706738.
- [86] YUSSOF H, ABDULLAH S C, OHKA M. Development of optical three-axis tactile sensor and its application to robotic hand for dexterous manipulation tasks [C]. 2010 Fourth Asia International Conference on Mathematical/Analytical Modelling and Computer Simulation. IEEE, 2010: 624-629.
- [87] XIE H, JIANG A, SENEVIRATNE L, et al. Pixel-based optical fiber tactile force sensor for robot manipulation [C]. *Sensors*, 2012 IEEE. IEEE, 2012: 1-4.
- [88] XIE H, JIANG A, WURDEMANN H A, et al. Magnetic resonance-compatible tactile force sensor using fiber optics and vision sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(3): 829-838.
- [89] ATHANASSIOU A, MASSARO A, CAZZATO P, et al. Improvements of optical tactile sensors for robotic system by gold nanocomposite material [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2012, 12 (6): 4878-4882.
- [90] SPANO F, DABROWSKA A, QUANDT B M, et al. Flexible touch sensors based on nanocomposites embedding polymeric optical fibers for artificial skin applications [J]. *International Conference on Nanotechnology, IEEE*, 2015, 7(15): 1295-1298.
- [91] YAMAZAKI H, NISHIYAMA M, WATANABE K. A hemispheric hetero-core fiber optic tactile sensor for texture and hardness detection, *Photonic Instrumentation Engineering III [C]*. *International Society for Optics and Photonics*, 2016.
- [92] MLEHI B, RYU S C, CUTKOSKY M R, et al. Exoskeletal force-sensing end-effectors with embedded optical fiber-Bragg-grating sensors [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2009, 25(6): 1319-1331.
- [93] 许会超, 苗新刚, 汪苏. 基于 FBG 的机器人柔性触觉传感器 [J]. *机器人*, 2018, 40(5): 634-639.
- XU H CH, MIAO X G, WANG S. A flexible tactile sensor for robot based on FBG [J]. *Robot*, 2018, 40(5): 634-639.
- [94] 钱牧云, 余有龙, 李慧, 等. 基于光纤光栅的机械手指触滑觉传感研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(4): 730-736.
- QIAN M Y, YU Y L, LI H, et al. Research on tactile and sliding sensing of the mechanical finger based on the fiber Bragg grating [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(4): 730-736.
- [95] QIAN M, YU Y, REN N, et al. Sliding sensor using fiber Bragg grating for mechanical fingers [J]. *Optics Express*, 2018, 26(1): 254-264.
- [96] SOSAMA S, KUMAR A, CHANDAN KUMAR M. Fiber Bragg grating tactile sensor for imaging [J]. *Optik*, 2019, 198: 163062.
- [97] MASSARI L, FRANSVEA G, D' ABBRACCIO J, et al. Functional mimicry of Ruffini receptors with fibre Bragg gratings and deep neural networks enables a bio-inspired large-area tactile-sensitive skin [J]. *Nature Machine Intelligence*, 2022, 4(5): 425-435.
- [98] PEDROSO M A, NEGRI L H, KAMIZI M A, et al. Tactile sensor array with fiber Bragg gratings in quasi-distributed sensing [J]. *Journal of Sensors*, 2018, 2018: 6506239:1-6506239:8.
- [99] LIANG Q, ZOU K, LONG J, et al. Multi-component FBG-based force sensing systems by comparison with other sensing technologies: a review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(18): 7345-7357.

- [100] 裴丽, 吴良英, 王建帅, 等. 啁啾相移光纤光栅分布式应变与应变点精确定位传感研究[J]. 物理学报, 2017, 66(7): 19-27.
PEI L, WU L Y, WANG J SH, et al. Phase shift chirped fiber Bragg grating based distributed strain and position sensing [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(7): 19-27.
- [101] 孟凡勇, 卢建中, 闫光, 等. 长啁啾光纤光栅分布式双参量传感特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(9): 2210-2216.
MENG F Y, LU J ZH, YAN G, et al. Research on distributed double-parameter sensing characteristics of long chirped fiber Bragg grating[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(9): 2210-2216.
- [102] 汤晨, 何彦霖, 祝连庆, 等. 基于光纤光栅的软体机器人末端力测量方法研究[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(7): 219-227.
TANG CH, HE Y L, ZHU L Q, et al. Research on end force measurement method of soft robot based on fiber Bragg grating [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(7): 219-227.
- [103] HE Y L, ZHANG X, ZHU L Q, et al. Optical fiber sensor performance evaluation in soft polyimide film with different thickness ratios [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19(4): 790.
- [104] YANG J C, KIM J O, OH J, et al. Microstructured porous pyramid-based ultrahigh sensitive pressure sensor insensitive to strain and temperature[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(21): 19472-19480.

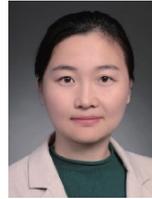
作者简介



谷可欣, 2021 年于山东建筑大学获得学士学位, 现为北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感技术。

E-mail: gukexin1234@163.com

Gu Kexin received her B. Sc. degree from Shandong Jianzhu University in 2021. Now she is a M. Sc. candidate in School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University. Her main research interest includes fiber sensing technology.



李红 (通信作者), 2009 年于河北工业大学获得学士学位, 2012 年于北京信息科技大学获得硕士学位, 2016 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学副教授, 主要研究方向为光纤传感技术、仪器科学与精密测量等。

E-mail: lihong@bistu.edu.cn

Li Hong (Corresponding author) received her B. Sc. degree in 2009 from Hebei University of Technology, received her M. Sc. degree in 2012 from Beijing Information Science and Technology University, and received her Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2016. Now she is an associate professor in Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include optical fiber sensing technology, instrument science and precision measurement.