

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413332

# 光纤布拉格光栅力传感器在微创手术中的应用\*

鲁国志<sup>1,2</sup>, 耿鹏<sup>1,2</sup>, 黄宇辰<sup>1,2</sup>, 周虹吉<sup>1,2</sup>, 何彦霖<sup>1,2</sup>

(1. 北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院 北京 100192; 2. 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 100016)

**摘要:**微创手术由于具有创伤小、疼痛轻、恢复快等优点,目前在临床很多领域均有应用。由于微创手术切口小的限制,手术部位缺乏直接的触觉反馈,显著增加了术中操作的复杂性,因此,实现术中实时精确的力感知对于手术的精准性与安全性至关重要。光纤布拉格光栅传感器因其高灵敏度、抗电磁干扰、小尺寸和生物相容性等优势,在微创手术中展现出巨大的应用潜力。但是,目前仍有一些问题制约了该技术的进一步发展,亟需探索解决方案。故系统梳理了近十年来光纤光栅传感器在微创手术力感知方面的研究进展,总结了常见的光纤光栅应变与温度解耦技术,这对于减轻温度干扰、提高力感知精度起着关键作用。同时,详细阐述了光纤光栅力传感器在内窥镜微创手术、血管介入手术、视网膜显微手术等微创手术中的最新研究进展及应用情况,分析了传感器的结构设计和力反馈计算方法。此外,还深入探讨了光纤光栅力传感器在实际应用中面临的挑战,包括高精度微力传感器设计、实时数据处理与反馈、力传感器系统智能化、多模态数据融合以及产品化与临床转化等方面。最后,对光纤光栅力传感器的未来发展方向进行了展望,期待通过技术创新推动光纤光栅力传感器在医疗领域的广泛应用。

**关键词:** 光纤布拉格光栅; 微创手术; 力测量; 温度补偿

中图分类号: TN253 TH73 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4020

## Application of optical fiber Bragg grating force sensor in minimally invasive surgery

Lu Guozhi<sup>1,2</sup>, Geng Peng<sup>1,2</sup>, Huang Yuchen<sup>1,2</sup>, Zhou Hongji<sup>1,2</sup>, He Yanlin<sup>1,2</sup>

(1. School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China)

**Abstract:** MIS is widely utilized in numerous clinical fields due to its advantages, such as minimal trauma, reduced pain, and rapid recovery. However, the small incisions characteristic of MIS limit direct tactile feedback at the surgical site, significantly increasing the complexity of intraoperative operations. As a result, the real-time and accurate force sensing during surgery is considered essential for ensuring both precision and safety. FBG sensors, due to their high sensitivity, electromagnetic interference resistance, small size, and biocompatibility, are regarded as highly promising for MIS applications. But several challenges still hinder the further development of this technology, necessitating the exploration of solutions. This paper systematically reviews the research progress of FBG sensors in force sensing for MIS over the past decade. Common techniques for decoupling strain and temperature in FBG sensors are summarized, which are crucial for mitigating temperature interference and improving force sensing accuracy. Furthermore, the latest advancements and applications of FBG force sensors in endoscopic MIS, vascular interventional surgery, retinal microsurgery, and other MIS procedures are discussed, with a focus on sensor structure design and force feedback calculation methods. The challenges associated with the practical application of FBG force sensors, including the design of high-precision micro-force sensors, real-time data processing and feedback, sensor system intelligence, multi-modal data fusion, and the commercialization and clinical translation of these sensors, are also examined. Finally, the paper envisions future development directions for FBG force sensors, emphasizing the potential of technological

收稿日期: 2024-09-30 Received Date: 2024-09-30

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61903041)、北京市自然科学基金(4204101)项目资助

innovations to enable their widespread adoption in the medical field.

**Keywords:** fiber Bragg grating; minimally invasive surgery; force measurement; temperature compensation

## 0 引言

随着医疗水平技术的蓬勃发展,微创手术(minimally invasive surgery, MIS)逐渐在各类外科手术中得到了广泛应用。与传统的开放手术相比,MIS可显著减少患者的失血量和疼痛感、减少术后并发症和缩短恢复时间<sup>[1]</sup>。目前临床常用的MIS有心脏外科手术<sup>[2]</sup>、胸腔镜手术<sup>[3]</sup>、腹腔镜手术<sup>[4]</sup>、视网膜显微外科手术<sup>[5]</sup>等。MIS依赖成像技术引导诊断和治疗<sup>[6-7]</sup>,但微创切口限制了器械的运动范围和灵活性,医生需凭借自身经验尽可能维持平稳操作,使手术器械推送至目标部位进行触诊。然而,施加在手术器械近端的力与末端执行器施加在组织上的力之间存在非线性关系<sup>[8]</sup>,医生难以精确感知手术器械与组织间的接触。因此,研究力感知能力手术器械对于精准指导医生术中操作具有重要意义。

传统的电学式力传感器在MIS中研究较早,根据其传感原理可以分为压阻式、电容式和压电式等。Radó等<sup>[9]</sup>通过在超薄硅胶膜中对称布置4个压敏电阻来测量应力,并将其集成到腹腔镜抓取头中。Kim等<sup>[10]</sup>设计了一种基于电容式传感器的新型手术钳,可以直接测量手术夹具末端的三维力。Gil等<sup>[11]</sup>提出了一种由聚偏二氟乙烯-三氟乙烯制成的力传感器,用于测量导管与血管内壁的接触力和腔内压力。尽管这些电学传感器在MIS中表现出较高灵敏度,但因普遍存在抗电磁干扰能力低、稳定性差等问题,限制了电学式传感器在医学领域的进一步推广应用。

近年来,光纤传感器因其尺寸小、重量轻、抗电磁干扰、良好的生物相容性等优点,广泛应用于外科器械力和形状传感<sup>[12]</sup>。现有的接触力光纤传感方法包括光强调制型、相位调制型和波长调制型。Bandari等<sup>[13]</sup>提出了一种简单小型化的基于光强调制的触觉传感器,用于微创手术抓取器。Uzun等<sup>[14]</sup>使用Fabry-Pérot干涉测量方法制造了一种通过钛涂层增强分辨率的新型光纤力传感器,并将其集成到活检针中。但是,光强调制易受光源波动干扰,相位调制易受相位不连续限制,相对而言,具有更高灵敏度和分辨率的波长调制却能够精准捕捉细微的物理量变化。波长调制型测力方法主要以光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)作为敏感元件。FBG通过改变光纤内部的折射率周期性分布,在特定的光学波长处产生反射效应,且对温度和应变非常敏感<sup>[15]</sup>,因此应用于力传感器具有潜在价值。

以往文献综述往往局限于微创手术中单一医疗器械<sup>[16-23]</sup>的力传感技术,或对在微创手术中应用的不同类

型力传感器<sup>[24-25]</sup>进行讨论,未对FBG力传感器在MIS中的独特优势及应用进展进行综述。因此,系统地概述了近十年来FBG力传感器在微创手术中的研究现状,阐明了基于FBG的力传感原理和温度解耦方法,分析了FBG力感知的适用场景和实现原理,指出亟待解决的关键问题,并对未来发展提出合理建议。

## 1 理论背景和测量原理

### 1.1 FBG的测量原理

当入射光穿过光栅区域时,特定波长的光将被反射,其余的光正常传输。反射光的波长可以被视为光栅区域的中心波长,主要取决于光栅的周期和光纤的折射率,可以定义为<sup>[26-27]</sup>:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

其中, $\lambda_B$ 为FBG的中心波长, $n_{eff}$ 是有效折射率, $\Lambda$ 是光栅周期。当光纤中的光栅区域受到机械应变(纵向和横向应变)和温度变化时,FBG的有效折射率和光栅周期都会发生变化,导致FBG的中心波长发生漂移,如图1所示。

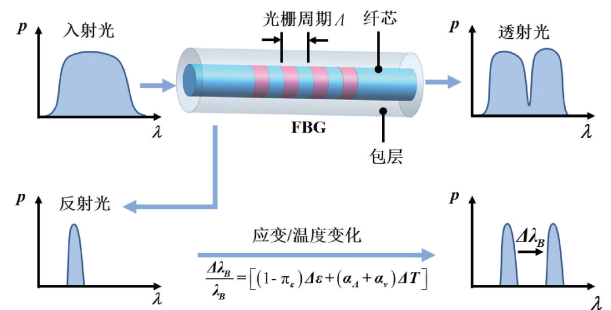


图1 光纤光栅传感原理

Fig. 1 Sensing principle of FBG

中心波长漂移、FBG应变和环境温度之间的关系定义为<sup>[26-27]</sup>:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = [(1 - p_e) \Delta\varepsilon + (\alpha_L + \alpha_n) \Delta T] \quad (2)$$

其中, $\Delta\lambda_B$ 是中心波长漂移, $\Delta\varepsilon$ 为FBG所受应变, $p_e$ 为光纤的光弹性系数, $\alpha_L$ 为光纤的热膨胀系数, $\alpha_n$ 为光纤的热光系数, $\Delta T$ 为FBG所处环境温度变化。

式(2)可以简化为<sup>[28]</sup>:

$$\Delta\lambda_B = K_\varepsilon \Delta\varepsilon + K_T \Delta T \quad (3)$$

其中, $K_\varepsilon$ 为光栅的应变灵敏系数, $K_T$ 为光栅的温度灵敏系数。

1.2 应变与温度解耦算法

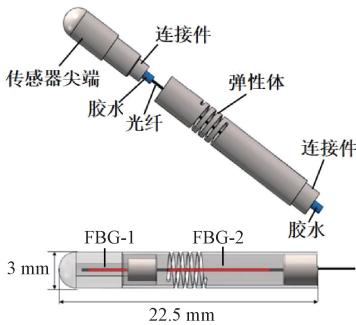
温度的变化会对 FBG 中心波长漂移产生显著影响,因此,在接触力测量过程中,温度补偿是必要的。在基于 FBG 的力传感器中,不同的方法已被广泛用于同时解耦应变和消除温度效应。

1) 参考光纤光栅法

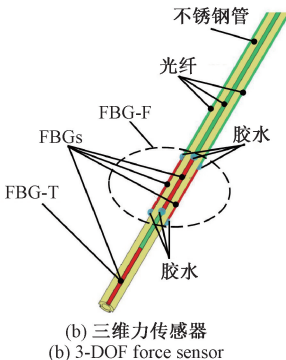
该方法将一根光栅作为传感光栅,另一根作为参考光栅,两者都受到温度变化的影响,但只有传感光栅会额外受力引起波长变化,通过两者波长差值实现温度补偿,如式(4)~(5)所示。Gan 等<sup>[29]</sup>设计了一种用于 MIS 的一维末端力传感器,一根光纤上使用两个多路复用的光栅,如图 2(a)所示。靠近传感器末端的 FBG 作为参考光栅,另一个 FBG 沿中心线保持紧密悬挂。Zhang 等<sup>[30]</sup>在微针上以 120°间隔植入 3 根光纤,其中一根光纤额外刻写一个参考 FBG,如图 2(b)所示。于昌新等<sup>[31]</sup>将一根不受力的 FBG 传感器悬挂粘贴在手术探针的表面用作温度补偿。

$$\begin{cases} \Delta\lambda_{B-1} = K_e \Delta\varepsilon + K_{T-1} \Delta T \\ \Delta\lambda_{B-2} = K_{T-2} \Delta T \end{cases} \quad (4)$$

$$\Delta\lambda_{B-1} - \frac{K_{T-1}}{K_{T-2}} \Delta\lambda_{B-2} = K_e \Delta\varepsilon \quad (5)$$



(a) 组织触诊力传感器  
(a) Tissue palpation force sensor



(b) 三维力传感器  
(b) 3-DOF force sensor

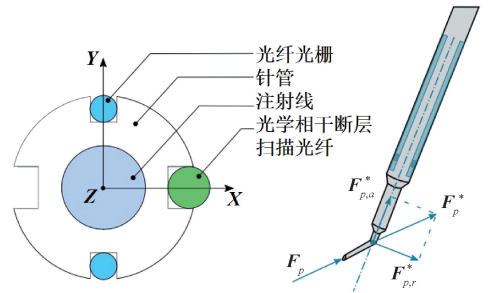
图 2 参考光纤光栅法传感器结构设计  
Fig. 2 Reference FBG method sensor structure design

2) 对称温度补偿法

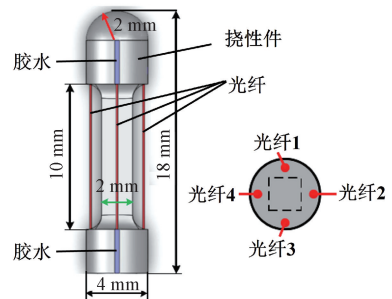
该方法通过对称设计让一对光纤受到相等但方向相反的应变影响,同时消除温度对波长漂移的干扰,如式(6)~(7)所示。Smits 等<sup>[32]</sup>在针管的表面相对位置留有 2 个凹槽,将 2 根 FBG 分别粘合在里面,当针尖受到横向力时,2 根光纤承受相同程度的拉伸和压缩应变,如图 3(a)所示。Shi 等<sup>[33]</sup>围绕传感器结构的表面间隔 90°放置 4 根 FBG,如图 3(b)所示。每两个相对的光纤在受到同一方向力时会产生方向相反但大小相等的应变,从而消除了温度变化对力测量的影响,提高了传感器精度。

$$\begin{cases} \Delta\lambda_{B-1} = K_e \Delta\varepsilon + K_T \Delta T \\ \Delta\lambda_{B-2} = -K_e \Delta\varepsilon + K_T \Delta T \end{cases} \quad (6)$$

$$\Delta\lambda_{B-1} - \Delta\lambda_{B-2} = 2K_e \Delta\varepsilon \quad (7)$$



(a) 力传感插管器械  
(a) Force sensing cannulation instrument



(b) 导管末端力传感器  
(b) Catheter distal force sensor

图 3 对称温度补偿法传感器结构设计

Fig. 3 Symmetric temperature compensation sensor structure design

3) 灵敏度差异法

该方法将 2 个光栅置于不同刚度结构中,通过两者的灵敏度差异抵消温度效应,保留纯力或应变信号,如式(8)~(9)所示。Deng 等<sup>[34]</sup>设计了一种腔内医疗工具尖端的微型力传感器,由不锈钢管和镍钛合金管组合而成。将刻在单根光纤上的 2 个 FBG 分别放在 2 个管中,2 个管子的材料刚度和热膨胀效应导致力和温度的灵敏度差异,如图 4(a)所示。Lou 等<sup>[35]</sup>设计了一种用于房颤消融导管末端的一维力传感器,有 2 段不同层数的连续矩形槽弹性体结构,将一对 FBG 分别置于 2 个弹性体

中, 由于其刚度差异, 从而实现温度补偿, 如图 4 (b) 所示。

$$\begin{cases} \Delta\lambda_{B,1} = K_{\varepsilon,1} \Delta\varepsilon + K_{T,1} \Delta T \\ \Delta\lambda_{B,2} = K_{\varepsilon,2} \Delta\varepsilon + K_{T,2} \Delta T \end{cases} \quad (8)$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{K_{T,2} \Delta\lambda_{B,1} - K_{T,1} \Delta\lambda_{B,2}}{K_{T,2} K_{\varepsilon,1} - K_{T,1} K_{\varepsilon,2}} \quad (9)$$

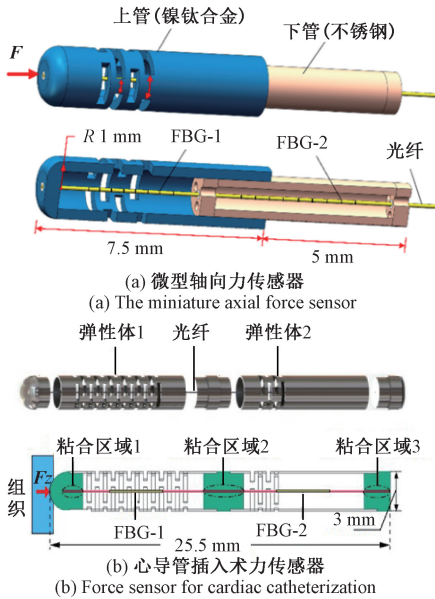


图 4 灵敏度差异法传感器结构设计

Fig. 4 Sensitivity difference method sensor structure design

参考光纤光栅法原理简单, 易于实现, 但是其温度补偿精度有限, 对复杂温度环境适应性差, 适用于对力测量精度不高、手术操作过程中温度变化相对平稳的微创手术, 例如内窥镜微创手术、穿刺手术等。对称温度补偿法能有效减轻温度对波长漂移的干扰, 并能提高测量精度, 但对传感器的结构设计和 FBG 的封装技术提出了严苛的要求, 主要适用于对力测量精度要求高的精细微创手术, 例如视网膜显微手术等。灵敏度差异法能够适应手术过程中温度和力的动态变化, 但需要综合考虑材料的选择和结构的设计以实现最佳的灵敏度差异效果, 适用于手术过程中操作频繁或温度变化较大的微创手术, 如心脏消融等血管介入手术血管介入手术等。

## 2 FBG 力传感器在微创手术中的应用

本节将深入探讨力传感器在内窥镜微创手术、血管介入手术、视网膜显微手术以及其他微创手术中的最新进展及应用, 着重对传感器结构设计和力反馈计算方法进行分析。

### 2.1 内窥镜微创手术

在微创内窥镜手术中, 外科医生通过自然孔道或体表微小切口插入内窥镜 (包括腹腔镜、胸腔镜等) 或相关手术器械来进行手术<sup>[36]</sup>。内窥镜手术的主要挑战之一是在将内窥镜推入体内或术中操作时缺乏力反馈。随着技术的不断进步, 基于 FBG 的力传感器已成为提升手术精准度与安全性的关键技术之一。

2018 年 Xue 等<sup>[37]</sup>设计了一种基于 FBG 的张力传感器, 用于腹腔镜手术机器人中的抓握力估算, 如图 5 所示。传感器通过测量电缆张力来间接估算末端执行器的抓握力, 利用 FBG 对应变的敏感特性, 将 FBG 粘贴在传感器倾斜悬臂的凹槽中, 通过电缆张力引起的悬臂微小变形来测量张力。

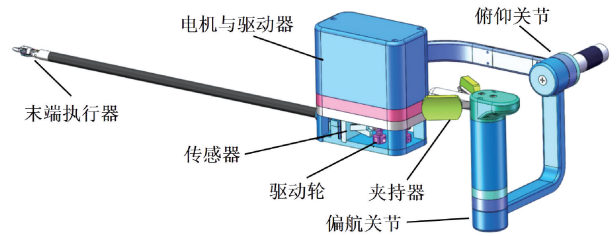


图 5 腹腔镜手术机器人

Fig. 5 Laparoscope surgical robot

同年, Lai 等<sup>[38]</sup>提出了一种使用 FBG 传感器来测量柔性内窥镜机器人中肌腱鞘机构远端接触力的新方法, 从而间接获得肌腱上的张力。2019 年 Lai 团队<sup>[39]</sup>进一步缩小了传感器尺寸和光栅长度, 并研究了参考光栅温度补偿方法, 提高了灵敏度。2021 年 Lai 团队<sup>[40]</sup>通过偏心结构设计实现了内窥镜手术机器人拉力、转向力和提升力的同时测量, 并在体外实验中成功应用于猪结肠组织的操作, 为手术操作提供了直观的力反馈, 如图 6 所示。

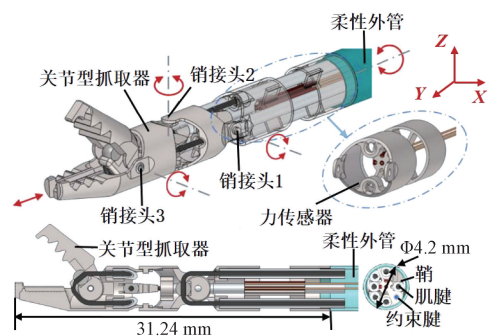


图 6 内窥镜手术钳 3-DOF 力传感器

Fig. 6 3-DOF force sensor for endoscopic surgical forceps

2019 年 Shi 等<sup>[41]</sup>设计了一种具有两种不同设计参数的用于腹腔镜手术的末端力传感器, 分别在 [0 N, 12 N] 和



[0 N, 7 N]测量范围内实现 21 mN 和 9.3 mN 的高分辨率。力敏挠性件继承了刚性 Stewart 平台结构的优点,实现了较宽的线性测量范围和较强的抵抗横向力载荷的能力。2024 年 Li 等<sup>[42]</sup>设计一种用于内窥镜手术的微型六轴力/扭矩传感器,将 6 根 FBG 粘接到 Stewart 平台结构每个连杆的凹槽中。Li 等<sup>[43]</sup>将 6 根 FBG 基于 Stewart 型结构悬挂并牢固地粘附到弹性体的指定凹槽,该传感器可以集成到腹腔镜手术钳中用于实时力反馈,如图 7 所示。同时,为了解决 FBG 的非线性响应和 MIS 中的断裂风险,提出了一种基于海鸥优化极限学习机算法的非线性解耦和容错算法,当一个 FBG 断裂时,六轴 F/M 测量的相对误差 < 9.99%。

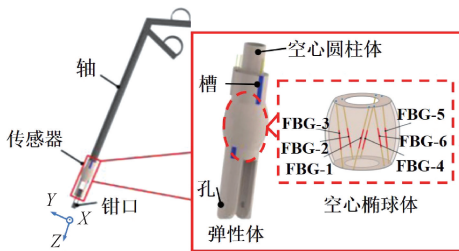


图 7 一种用于腹腔镜的六轴 FBG 力/力矩传感器  
Fig. 7 A six-axis FBG force/moment sensor for laparoscopic instruments

2020 年 Deng 等<sup>[44]</sup>设计了一种微型三轴光纤力传感器测量输尿管软镜镜头末端力,如图 8 所示。3 根 120°间隔分布的周向 FBG 测量横向力,一根中心 FBG 用于测量轴向力。2022 年 Wang 等<sup>[45]</sup>采用相似的 FBG 分布方法,但将周向的一根光纤用于温度补偿。Li 等<sup>[46]</sup>利用沿中心线均匀分布的 3 根 FBG 来检测作用在传感器末端的力,将另一根 FBG 偏心放置在不远处作温度补偿,如图 9 所示。

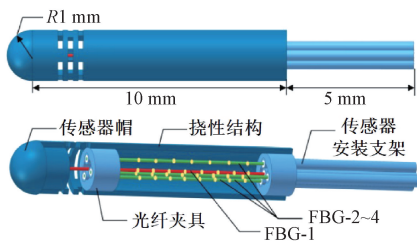


图 8 用于输尿管软镜的三轴光纤力传感器  
Fig. 8 A triaxial fiber optic force sensor for flexible ureteroscopy

2021 年 Sun 等<sup>[47]</sup>设计了一种基于 FBG 的夹持力传感器,为腹腔镜手术提供交互力反馈,如图 10 所示。力敏挠性件采用桥式结构,具有优异的承载能力和抗干扰能力,可将施加在抓取表面上的垂直力或位移输

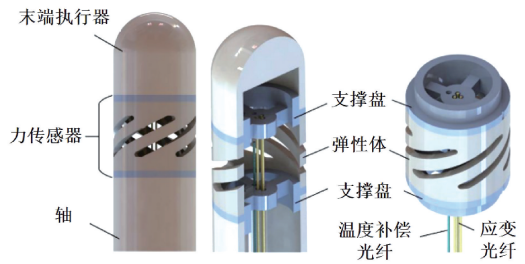


图 9 用于机器人辅助手术的基于 FBG 的三轴力传感器  
Fig. 9 An FBG-based triaxial force sensor for robotic-assisted surgery

入线性转换为沿挠曲件中心线的水平变形。光纤的两端粘贴在力敏挠曲件的中心线上,以感测垂直力引起的水平应变。

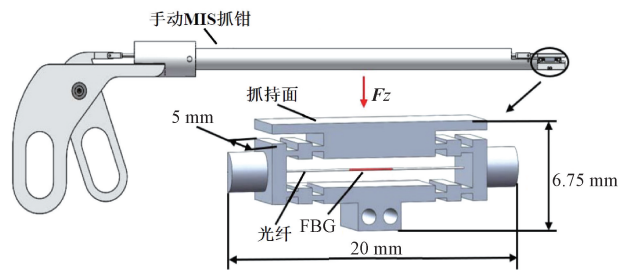


图 10 集成在腹腔镜手术抓取器上的力传感器  
Fig. 10 A force sensor integrated on a grasper for laparoscopic surgery

2024 年 Wang 等<sup>[48]</sup>专为柔性内窥镜手术机器人设计一种基于 FBG 的微型三轴力传感器,如图 11 所示。

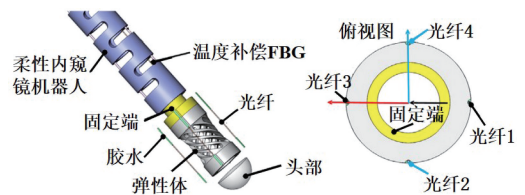


图 11 用于柔性内窥镜机器人的基于 FBG 的三轴力传感器

Fig. 11 A triaxial force sensor based on FBGs for flexible endoscopic robot

传感器通过优化复合柔性结构(包含平行螺旋槽和椭圆铰链)和 4 个 FBG 传感器,实现了高灵敏度和高精度的三维力检测。传感器在 -1~1 N 的横向力,其分辨率达到 0.77 和 0.79 mN,在 0~2 N 的轴向力,其分辨率达到 1.25 mN。同年,Wang 团队<sup>[49]</sup>提出了一种具有实时触觉反馈的柔性内窥镜(Tac-scope),如图 12 所示。通过在内窥镜末端嵌入 FBG 传感器,实现了对管腔壁接触力的检测,同时保留了内窥镜的原有功能。Tac-scope 的紧

凑尺寸使其能够用于其他经自然腔道内镜手术, 包括经尿道、阴道内窥镜和胃肠内窥镜手术, 具有应用和推广的潜力。

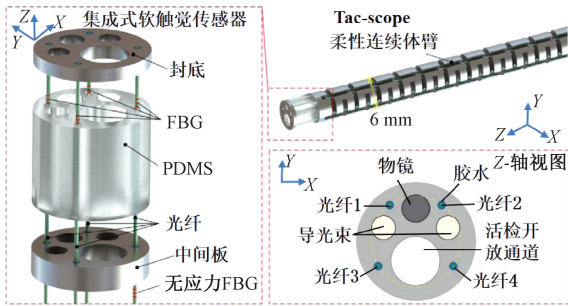


图 12 集成 FBG 软传感器的柔性内窥镜  
Fig. 12 A flexible endoscope with an embedded FBG soft sensor

本小节总结了内窥镜微创手术领域内 FBG 力传感器的最新研究趋势与技术进展, 基于 FBG 的力传感技术在内窥镜手术中表现出了良好的适应性。如腹腔镜手术机器人的抓握力测量、柔性内窥镜机器人中的肌腱张力监测以及输尿管软镜的力测量等, 均得到了有效的验证和应用。这些进展不仅提高了手术的准确性, 也为术中提供了必要的力反馈。

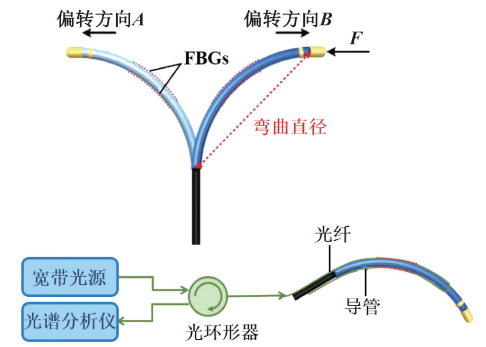
### 2.2 血管介入手术

血管介入手术作为一种非开胸的心血管疾病治疗手段, 依赖于细小导丝和导管在血管内部进行操作。力传感器的引入, 为这种高精度操作提供了高效的力反馈机制, 使得医生能够在无直接接触觉的条件下, 准确感知导管在血管中递送时与组织的接触力, 避免组织穿孔或血管损伤。

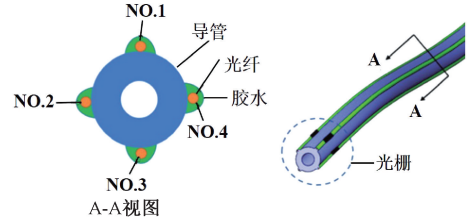
2017 年 Xu 等<sup>[50]</sup>设计了一种基于 FBG 对的温度不敏感接触力传感器, 用于双向导管在电生理映射和消融过程中的力反馈, 如图 13(a) 所示。传感器利用 2 个具有相同中心波长的 FBG 分别固定在双向导管 2 个相对的偏转弧上, 通过测量 2 个 FBG 光谱分叉 (即 FBG 对波长差的变化) 来量化接触力。2018 年 He 等<sup>[51]</sup>提出了一种变刚度导管插入系统, 采用具有水冷结构的形状记忆聚合物来实现导管的可变刚度, 使用 4 个 FBG 传感器连接到导管尖端监测接触力, 如图 13(b) 所示。

2018 年 Gao 等<sup>[52]</sup>设计了一种基于平行柔性铰链的微型 FBG 三轴力传感器, 3 根 FBG 沿内管壁均匀分布, 一根 FBG 沿中心线放置, 如图 14 所示。采用基于模型和无模型的方法对横向力和轴向力进行解耦, 都可以实现分辨率 < 1 g 的三轴力预测。

2018 年 Li 等<sup>[53]</sup>设计了一种新型的高灵敏度三维导管尖端力传感器, 可以集成到消融导管末端, 如图 15(a)



(a) FBG 嵌入式双向导管的详细结构  
(a) Detailed structure of FBG embedded bi-directional catheter



(b) 具有可变刚度和力感应的血管内介入机器人  
(b) An endovascular intervention robot with variable stiffness and force sensing

图 13 集成 FBG 的导管结构

Fig. 13 Catheter structure with integrated FBG

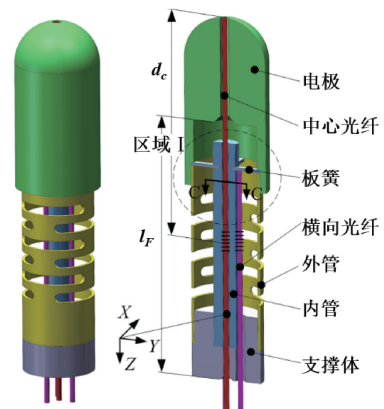


图 14 具有平行挠曲铰链的基于 FBG 的三轴力传感器  
Fig. 14 An FBG-based triaxial force sensor with parallel flexure hinges

所示, 并在硅胶主动脉血管模型中进行了不同空间角度的动态加载实验和体外实验。2020 年 Li 团队<sup>[54]</sup>通过进一步优化结构设计, 如图 15(b) 所示, 使传感器的分辨率得到显著提升。2024 年 Li 团队<sup>[55]</sup>提出了一种基于斑点鬣狗优化反向传播神经网络的容错算法, 用于处理手术过程中 FBG 断裂时的精确力测量, 最大满量程相对误差 < 6%。

2020 年 Akinyemi 等<sup>[56]</sup>通过将两根 FBG 集成在 3D 打印挠曲件中, 设计了毫牛顿力传感器, 用于经皮冠状动脉介入治疗手术。2022 年 Shin 等<sup>[57]</sup>使用 ANSYS 仿

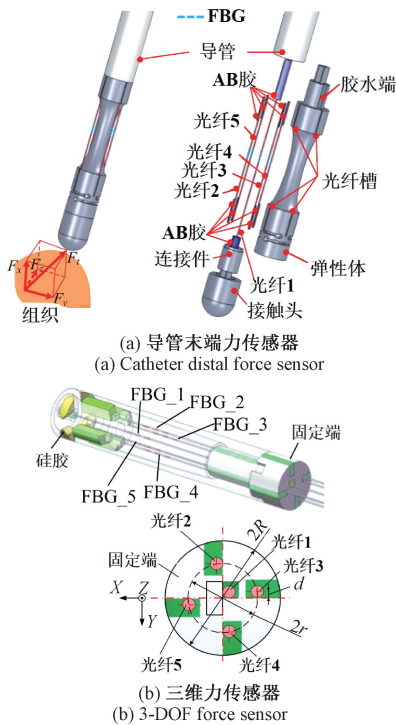


图 15 消融导管末端力传感器

Fig. 15 Catheter distal force sensor for cardiac ablation

真软件设计并模拟了两种不同弯曲结构的 FBG 力传感器,如图 16 所示,验证其在导管尖端中使用的灵敏度和耐用性,结果表明螺旋结构比穿孔结构具有更高的灵敏度。

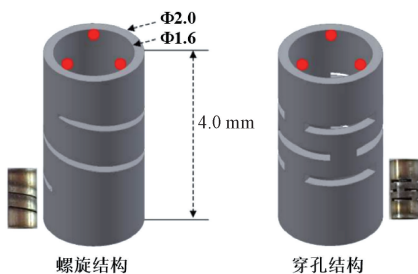


图 16 力传感器尖端的螺旋和穿孔图案结构

Fig. 16 Helical and perforated patterned structure for the tip of the force sensor

2019 年 Taghipour 等<sup>[58]</sup>设计了一种用于心脏消融导管的三维力和扭矩传感器,测量在 MIS 器械尖端产生的接触力和扭矩,如图 17 所示。采用 FBG 作为传感器的传感元件,通过差分测量方法实现了温度不敏感性。2023 年 Gan 等<sup>[59]</sup>同样针对消融手术导管末端力反馈问题设计了新的传感器结构,沿中心线的光纤不仅实现了温度补偿,还用于轴向力检测,另外 4 个圆周分布的 FBG 用于横向力检测,实现了有效的温度解耦和精确的力测

量,如图 18 所示。为进一步提高测量精度,建立了非线性神经网络模型,以减少组装和制造误差,在任意方向上获得了优异的力测量效果,其均方根误差均在全量程的 2% 以下。

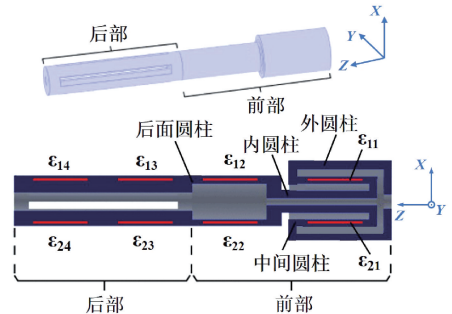


图 17 用于微创介入的三轴力和扭矩传感器

Fig. 17 Triaxial force and torque sensor for minimally invasive interventions

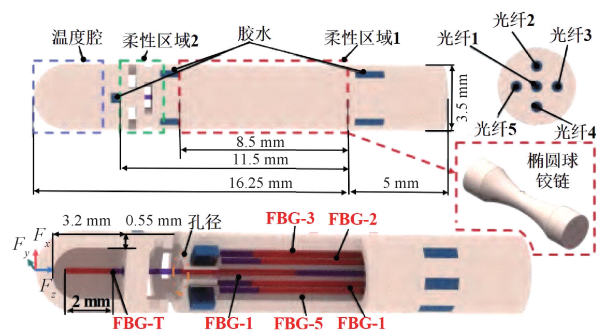


图 18 用于导管消融的 FBG 三轴力传感器

Fig. 18 Triaxial force sensor based on FBG for catheter ablation

力传感器在血管介入手术中的应用,显著提升了术中操作的精确性和安全性。医生借助力传感器可以更准确地操控导丝和导管,实时监测与血管壁或组织接触时力的大小,有效预防组织穿孔、撕裂以及血栓形成等并发症的发生,为患者带来更安全、更有效的治疗体验。

### 2.3 视网膜显微手术

视网膜显微手术是在脆弱组织上进行的最具技术挑战性的外科手术之一。外科医生需要通过手术显微镜的放大和对手术运动的精细控制对小而脆弱的眼组织进行手术。施加过大的力会导致视网膜出血和撕裂,从而导致不可逆的损伤。

在许多医学手术中,轴向力和横向力之间的解耦在工具-组织相互作用期间是必不可少的,尤其是在需要极其精确和精细操作的视网膜显微手术中。2016 年 Abushagur 等<sup>[60]</sup>提出了一种利用锥形光纤布拉格光栅 (tapered fiber Bragg grating, TFBG) 实现轴向力和横向力解耦的新方法,如图 19 所示。在仪器的中性轴处使用



TFBG, 可以通过横向和轴向施加力来实现带宽调谐, 而由于光纤对称性, 外部标准 FBG 的带宽对轴向力不敏感。因此, 当同时施加混合力时, TFBG 中的串扰(横向力)可以很容易地滤除。2019 年 Abushagu 团队<sup>[61]</sup>利用 TFBG 和带宽调制方法设计了一种用于玻璃体视网膜显微外科手术的力传感器, 在 1 ~ 10 N 范围内均方根误差 < 0.356 N。

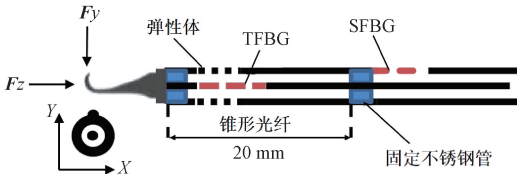


图 19 用于显微外科手术针的 2 维力传感器  
Fig. 19 2-D force sensor for a microsurgical needle

膜剥离是视网膜显微外科手术中具有挑战性的过程, 外科医生通常使用微型镊子从视网膜表面剥离一层非常薄的纤维组织。2016 年 Gao 等<sup>[62]</sup>在早期设计的横向力感应微型镊子<sup>[63]</sup>的基础上, 额外沿中心轴新增一个 FBG 用于感应轴向力。2017 年 Gonenc 团队<sup>[64]</sup>对微型镊子的结构进行改进, 如图 20 所示, 通过线性回归和基于伯恩斯坦多项式的非线性拟合方法校准传感器。随机力加载实验表明, 横向力的均方根误差 < 0.15 mN, 轴向精度在 2 mN 以内。

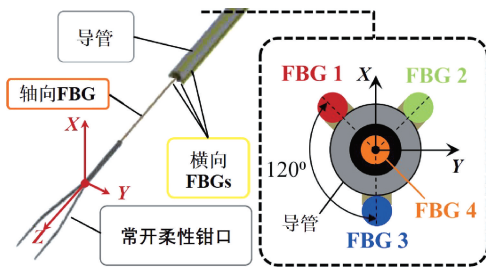


图 20 电动力感应微型镊子  
Fig. 20 Motorized force-sensing micro-forceps with the force-sensitive

2019 年 Patel 等<sup>[65]</sup>首次在离体猪眼模型上测量了玻璃体视网膜手术中的巩膜力。通过使用基于 FBG 的力传感器, 测量了临床医生在手动和机器人辅助模式下跟随视网膜血管时产生的巩膜力, 如图 21 所示。2020 年 Ebrahimi 等<sup>[66]</sup>提出了一种基于随机力估计的方法, 能够有效预估手术中的插入深度和工具尖端位置。

2020 年 Xu 等<sup>[67]</sup>首次将力传感器嵌入到同心管手术机器人中, 如图 22 所示。该团队设计了一种由半切槽

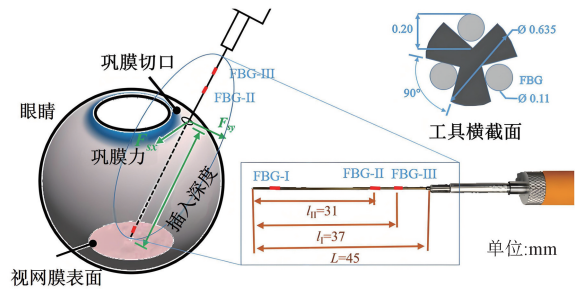


图 21 基于 FBG 的力传感工具原理  
Fig. 21 Schematic of an FBG-based force sensing tool

和 FBG 传感器组成的新型力传感模块, 可以集成到直径为 0.43 mm 的内管中。通过有限元分析和实验分别对直管上的一轴模块和两轴模块的力传感模型进行验证, 复合梁模型与力传感模块高度兼容, 能够以 0.25 mN 的分辨率检测横向力。

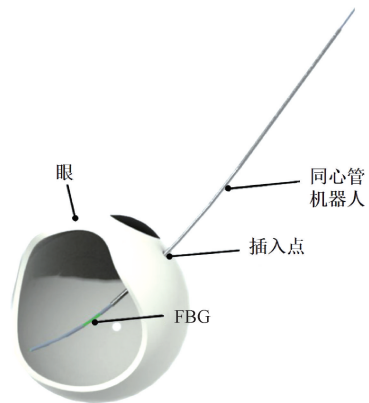


图 22 具有力传感功能的同心管眼科手术机器人  
Fig. 22 Concentric tube-based eye surgery robot with force sensing capability

2022 年 Zhang 等<sup>[68]</sup>设计了一种用于视网膜微创手术的三自由度力传感微针, 如图 23 所示。3 个带有双 FBG 传感器的光纤沿镍钛合金管外表面纵向排列, 基于力学模型解耦出横向力和轴向力, 分辨率分别为 0.124 和 0.74 mN。

2022 年 Zhang 等<sup>[30]</sup>设计了一种新型的空心管三自由度力传感器, 可作为视网膜手术中微针或镊子的力传感器, 如图 2(b) 所示。采用线性标定法和最小二乘支持向量回归相结合的方法, 有效地降低了线性和非线性误差的影响。2023 年 Zhang 等<sup>[69]</sup>设计了一种长度仅为 3.8 mm, 可在视网膜静脉插管过程中调节穿刺角度的三维力传感器, 如图 24 所示。利用 3D 打印技术, 将光纤和注射管路嵌入镍钛合金管中, 实现力传感和注射功能的一体化。



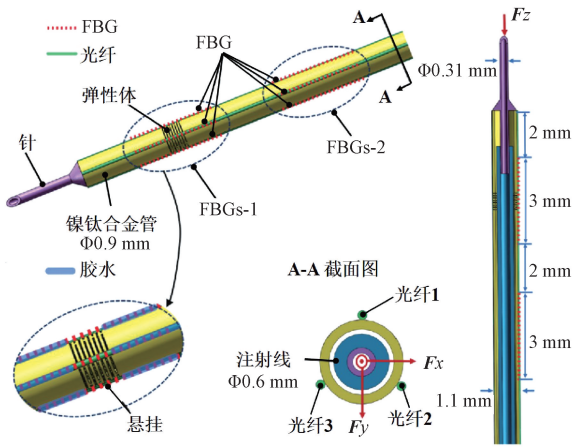


图 23 3-DOF 力传感微针的 CAD 模型

Fig. 23 CAD model of the 3-DOF force sensing microneedle

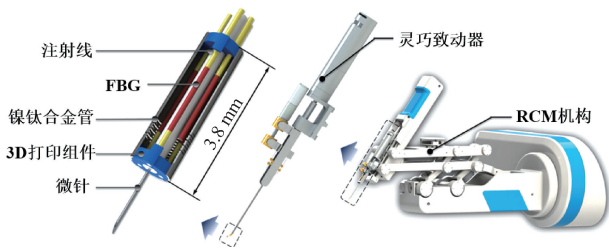


图 24 一种用于眼内手术机器人的微型三自由度力传感器

Fig. 24 A micro-3-dof force sensor for intraocular surgical robots

2023 年 Zhang 等<sup>[70]</sup>设计了一种用于眼科显微手术微钳的 FBG 三维力传感器,如图 25 所示。通过创新的柔性铰链和柔性杠杆结构增强了轴向力测量灵敏度,并采用双光栅温度补偿方法减少温度对测量的影响。该微力传感器在横向力和轴向力测量上分别达到了 0.13 和

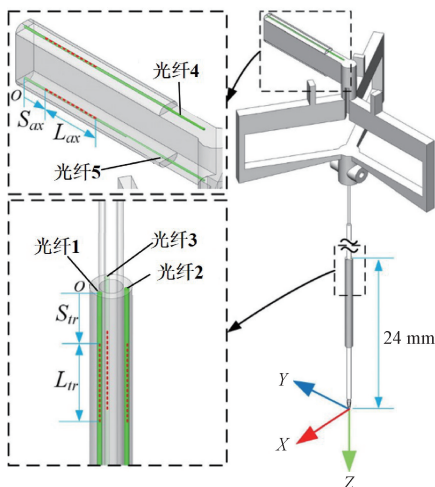


图 25 微钳三维微力传感器

Fig. 25 The 3-D micro-force sensor for micro-forceps

0.30 mN 的分辨率。

力传感器能够帮助医生精确感知手术工具与视网膜之间的相互作用力,从而有效避免对脆弱的视网膜组织造成损伤,提高手术的成功率。力传感器在视网膜显微手术中的应用,无疑是眼科手术技术的一大革新,推动了手术技术向更加精细化的方向发展。

## 2.4 穿刺手术

穿刺手术是指在局部麻醉下将穿刺针穿过皮肤进入身体内部,以获取组织样本或抽取液体。2016 年 Ambasiha 等<sup>[71]</sup>提出一种利用 FBG 传感器实时动态监测腰椎穿刺过程中脊椎穿刺针所受作用力的技术。2019 年 Xiong 等<sup>[72]</sup>设计了一种新型的穿刺针传感器,不仅能够感应到轴向力,还可以感应穿刺过程中的扭矩。2022 年 Li 等<sup>[73]</sup>设计了一种用于穿刺医疗手术机器人的三维力传感器,如图 26 所示,可以集成到穿刺针的后端,精确测量穿刺针与软组织之间不同方向的相互作用力。采用有限元方法对其结构参数进行优化,并提出基于全局最优适应度函数的 BP 神经网络解决三维力之间的解耦问题,有效提高了力传感器的测量精度。

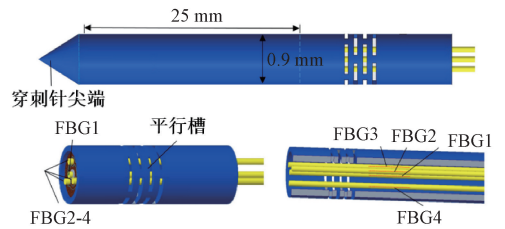


图 26 三维力 FBG 传感器结构

Fig. 26 Three-dimensional force FBG sensor structure diagram

除了上述几个应用领域,力传感器还在微创手术辅助诊断中展现出其不可替代的价值,例如组织触诊、光学活检等。医生通过使用触诊探头可以感知组织轮廓和表面反应力,根据识别的组织力学特性,估计疑似病灶的位置和大小,以实现对接病灶的定位识别,此外还可提取有关病灶组织大小的参数,为手术操作提供更多有效的决策信息<sup>[74]</sup>。

2018 年 Li 等<sup>[75]</sup>设计一种基于 FBG 的高灵敏度触觉传感器阵列,旨在微创手术中用于组织触诊和异常定位。2020 年 Li 团队<sup>[76]</sup>将力传感器集成到探针上,通过力映射实现对组织硬包块的识别和定位。2020 年 Lyu 等<sup>[77]</sup>设计了一种基于 Sarrus 机构的组织触诊力传感器,如图 27 所示,采用刚体替换法实现了良好的轴向线性力-变形关系和大的测量范围,在 0~5 N 的测量范围内实现 2.55 mN 的高分辨率,并在动态力刺激实验、嵌入模拟肿瘤的硅胶体模的体外触诊以及猪肝脏的离体压痕实验验证了传感器设计的有效性。

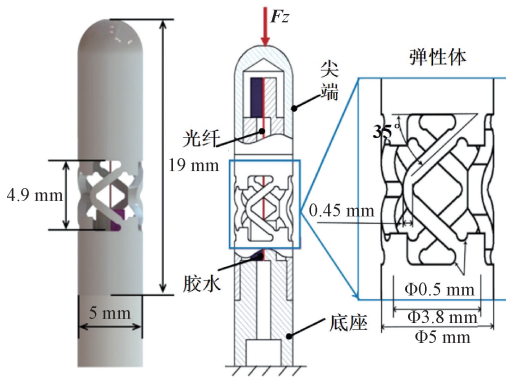


图 27 基于 FBG 的用于微创手术期间的组织触诊力传感器

Fig. 27 An FBG-based force sensor for tissue palpation during minimally invasive surgery

与传统的切除活检相比,光学活检技术能够一步完成原位体内诊断和治疗,识别潜在的癌前组织。在光学活检过程中,成像探头与组织之间的接触力对于确保高质量图像的采集以及维持与解剖结构的安全界限起着至关重要的作用。2020 年 Wu 等<sup>[78]</sup>设计了一种用于机器人支气管镜检查的三维力传感器,使用带有偏心内腔的锥形基板,将成像探头固定在内部,传感元件固定在外部,如图 28 所示。采用线性和非线性、基于回归和基于学习等各种解耦方法,成功实现了具有温度补偿的精确力传感。

术里,对称温度补偿法的稳定性有助于维持力传感器在手术中的可靠性;参考光纤光栅法因其简单实用可作为常规选择,但在心脏消融手术中因射频电流引起的局部温度变化时适应性欠佳;灵敏度差异法在一维轴向力测量上的优势可以应用于导管推送时的接触力测量,但侧向力测量能力有限。视网膜显微手术对力测量精度要求极高,在视网膜静脉插管、膜剥离等操作中,微小的误差会导致视网膜损伤,而对称温度补偿法具有良好的温度稳定性,能够减小温度波动引起的力偏差,保证传感器高精度测量;参考光纤光栅法和灵敏度差异法对于高精度的力测量需求可能略显不足。以上都是通过将 FBG 封装于弹性体内实现的温度补偿方法,虽然可以改善温度对应变的影响,但对制造装配误差等非线性因素干扰无法避免,目前不少学者通过机器学习方法有效提高了传感器的测量精度和抗干扰能力,从而为手术提供可靠的力反馈。

### 3 挑战与未来发展方向

1) 高精度微力传感器设计。当前研究重点在于如何通过优化 FBG 传感器结构、材料和封装工艺,实现更高的测量精度。但传感器的精度往往会受到诸多非线性因素的干扰,包括传感器制造和装配误差、环境温度变化、校准平台的不稳定性等。因此,提升制造工艺精度、研发温度补偿技术、改进校准方法以实现传感器高精度测量,是亟待解决的关键问题。

2) 实时数据处理与反馈。手术过程中,迅速捕捉和精确处理快速变化的力信号,能确保医生及时做出反应。力与波长漂移的解耦算法常采用经验公式,未充分考虑非线性因素的干扰,解耦后的力信号误差较大,无法精准反映实际受力。FBG 解调主要利用光学仪器设备完成对反射谱中心波长的调制,光路连接器和探测器等设备自身的非线性及延迟等原因会导致光谱产生变形,从而对波长解调过程产生非必要的干扰。因此,基于机器学习的快速解耦模型将是未来精准分离力信号的重要研究方向,同时探索 FBG 高速解调方法,实现对波长变化的快速采集,确保 FBG 传感器能够在手术中提供高质量的实时反馈。

3) 力传感系统智能化。智能化力传感器系统基于实时采集的力学数据,通过算法分析预测手术过程中可能存在的风险,并结合控制系统自动调整器械的动作和施加的力量,避免损伤周围健康组织。通过结合增强现实技术和高分辨率触觉反馈装置,设计直观的交互界面,如通过颜色编码和虚拟力场可视化显示不同的压力等级,利用触觉反馈模拟实际触感,增强医生对手术现场情况的感知,进一步提高手术的精确度和安全性。

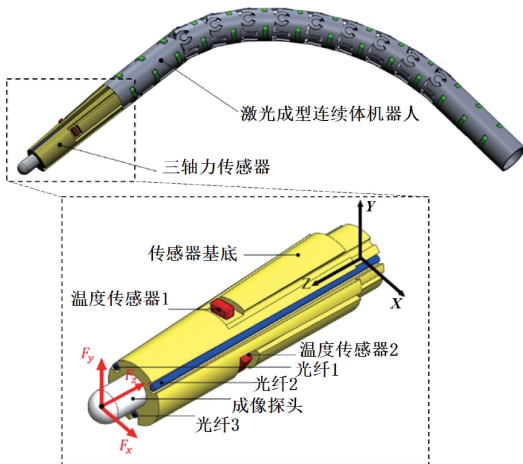


图 28 拟设计的力传感器和激光成型连续体机器人的结构  
Fig. 28 The structure of the developed force sensor and the laser-profiled continuum robot

在内窥镜微创手术和穿刺手术中,参考光纤光栅法易于集成,应用广泛,能基本满足手术对力测量精度的需求;对称温度补偿法和灵敏度差异法对结构要求高,难以集成在手术钳等结构复杂的手术器械上。心血管介入手

4)多模态数据融合。目前微创手术 FBG 传感器主要专注于力的测量,但单一模态数据难以满足复杂手术场景的多样化需求。例如,结合视觉图像可以清晰识别手术部位的解剖结构、病变组织等目标对象;通过触觉传感器可以感知手术器械与组织接触时的表面纹理、硬度、弹性等信息;融合温度传感器可以监测手术部位或手术器械周围组织的温度变化。未来的发展方向应是探索多模态传感器的集成,通过融合力与视觉、触觉和温度等模态,实现对手术环境的全面感知,提高医生面对复杂手术环境精准决策的能力。

5)产品化与临床转化。虽然 FBG 力传感器在非人体实验中性能良好,但在临床应用中的推广仍面临挑战。首先,传感器的稳定性和可靠性在临床应用中有待进一步验证。其次,FBG 力传感器与现有医疗设备的兼容性也面临挑战,例如与手术机器人、成像系统等集成需要解决数据接口、信号传输协议等问题。最后,当前医疗器械行业的标准化和认证流程较长,此外,新型传感器的安全性和适用性评估方面仍缺乏相应的行业规范。因此,进一步加强与医疗器械制造商的合作,广泛开展临床试验,推动 FBG 力传感器的产品化进程,制定行业标准与规范,将是确保产品的可靠性和安全性的有效手段。

## 4 结 论

本研究对用于微创手术的基于 FBG 的力传感器进行了全面概述。首先从 FBG 的基本传感原理出发,分析了几种现有的应变与温度解耦方法,构建具有温度补偿的力传感模型,可以提高传感器在复杂环境下的稳定性和可靠性。通过总结力传感器在内窥镜手术、心血管介入手术、视网膜显微手术等微创手术的研究现状和发展趋势,详细阐述了力感知能力在术中应用的重要性,最后讨论了微创手术力传感器的后续发展方向。

随着对基于 FBG 的力传感器技术的深入研究,当前的焦点已从基本的力测量能力转向如何进一步提高测量精度和实时性能,尤其是针对如视网膜显微手术等高精尖临床学科。此外,多模态融合技术的开发将有助于实现更全面的监测,增强手术的信息反馈。未来的力传感器系统是通过集成多种先进技术,包括但不限于传感技术、数据处理、机器学习、人机交互设计等,共同作用于提高微创手术的安全性、精确性和效率,推动 FBG 力传感器的产品化与临床转化。

通过以上技术的深入探索和研究,未来的微创手术将更加安全可靠,不仅为外科医生提供了更强大的操作工具,也为患者带来了更好的治疗效果,这些努力将推动 FBG 传感器在医疗领域的广泛应用和持续创新。

## 参考文献

- [1] 张帆,何彦霖,周康鹏,等. 穿刺手术柔性针路径规划技术现状和展望[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(6):1-13.  
ZHANG F, HE Y L, ZHOU K P, et al. Current situation and prospect of flexible needle path planning technology for puncture surgery[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(6):1-13.
- [2] HARKY A, CHAPLIN G, CHAN J S K, et al. The future of open heart surgery in the era of robotic and minimal surgical interventions[J]. Heart, Lung and Circulation, 2020, 29(1): 49-61.
- [3] UJIIE H, GREGOR A, YASUFUKU K. Minimally invasive surgical approaches for lung cancer[J]. Expert Review of Respiratory Medicine, 2019, 13(1/6): 571-578.
- [4] PRETE F P, PEZZOLLA A, PRETE F, et al. Robotic versus laparoscopic minimally invasive surgery for rectal cancer: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J]. Annals of Surgery, 2018, 267(6): 1034-1046.
- [5] ROIZENBLATT M, EDWARDS T L, GEHLBACH P L. Robot-assisted vitreoretinal surgery: Current perspectives[J]. Robotic Surgery: Research and Reviews, 2018, 5: 1-11.
- [6] 张博伟,何彦霖,王康,等. 基于全方位深层加权轻量化网络的冠脉造影图像超分辨率重建方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(7):200-209.  
ZHANG B W, HE Y L, WANG K, et al. Super resolution reconstruction of coronary angiography images based on the omnidirectional deep weighted lightweight network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(7):200-209.
- [7] 董兆苒,董明利,何彦霖,等. 血管介入手术导丝末端检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(2): 221-229.  
DONG ZH R, DONG M L, HE Y L, et al. Study on the detection method of putting guide wire endin vascular interventional surgery[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(2): 221-229.
- [8] ALFALAH H, RENDA F, STEFANINI C. Concentric tube robots for minimally invasive surgery: Current applications and future opportunities[J]. IEEE



- Transactions on Medical Robotics and Bionics, 2020, 2(3): 410-424.
- [ 9 ] RADÓ J, DÜCSÖ C, FÖLDESY P, et al. 3D force sensors for laparoscopic surgery tool [ J ]. *Microsystem Technologies*, 2018, 24: 519-525.
- [ 10 ] KIM U, KIM Y B, SEOK D Y, et al. Development of surgical forceps integrated with a multi-axial force sensor for minimally invasive robotic surgery [ C ]. 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2016: 3684-3689.
- [ 11 ] GIL B, LI B, GAO AN ZH, et al. Miniaturized piezo force sensor for a medical catheter and implantable device [ J ]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2020, 2(8): 2669-2677.
- [ 12 ] 张剑敏,熊鹏文,韦琦,等.面向纹理识别的便携式触觉传感器设计 [ J ]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(10): 66-73.
- ZHANG J M, XIONG P W, WEI Q, et al. Design of the portable tactile sensor for texture recognition [ J ]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(10): 66-73.
- [ 13 ] BANDARI N, DARGAHI J, PACKIRISAMY M. Miniaturized optical force sensor for minimally invasive surgery with learning-based nonlinear calibration [ J ]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(7): 3579-3592.
- [ 14 ] UZUN D, ÜLGEN O, KOCATÜRK Ö. Optical force sensor with enhanced resolution for MRI guided biopsy [ J ]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(16): 9202-9208.
- [ 15 ] CHEN J J, LIU B, ZHANG H. Review of fiber Bragg grating sensor technology [ J ]. *Frontiers of Optoelectronics in China*, 2011, 4: 204-212.
- [ 16 ] YANG CH J, XIE Y, LIU SH, et al. Force modeling, identification, and feedback control of robot-assisted needle insertion: A survey of the literature [ J ]. *Sensors*, 2018, 18(2): 561.
- [ 17 ] MO Z L, XU W L. Development of force sensing techniques for needle surgeries [ C ]. 2018 25th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP). IEEE, 2018: 1-5.
- [ 18 ] BARUA R, DATTA S, ROYCHOWDHURY A, et al. Study of the surgical needle and biological soft tissue interaction phenomenon during insertion process for medical application: A survey [ J ]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 2022, 236(10): 1465-1477.
- [ 19 ] OVERTOOM E M, HOREMAN T, JANSEN F W, et al. Haptic feedback, force feedback, and force-sensing in simulation training for laparoscopy: A systematic overview [ J ]. *Journal of Surgical Education*, 2019, 76(1): 242-261.
- [ 20 ] 张建勋,姚斌,代煜,等.机器人辅助腹腔镜手术中力感知技术的研究进展 [ J ]. *中国机械工程*, 2021, 32(21): 2521-2531.
- ZHANG J X, YAO B, DAI Y, et al. A review of force sensing technology in robot-assisted laparoscopic surgery [ J ]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(21): 2521-2531.
- [ 21 ] HOFFMAYER K S, GERSTENFELD E P. Contact force-sensing catheters [ J ]. *Current Opinion in Cardiology*, 2015, 30(1): 74-80.
- [ 22 ] SITARAMGUPTA V V S N, PADMANABHAN D, RAO P S M, et al. Force sensing technologies for catheter ablation procedures [ J ]. *Mechatronics*, 2019, 64: 102295.
- [ 23 ] CHENG W, YAO M, ZHAI B, et al. Contact force sensors in minimally invasive catheters: Current and future applications [ J ]. *Expert Review of Medical Devices*, 2021, 18(5): 445-455.
- [ 24 ] BANDARI N, DARGAHI J, PACKIRISAMY M. Tactile sensors for minimally invasive surgery: A review of the state-of-the-art, applications, and perspectives [ J ]. *IEEE Access*, 2020, 8: 7682-7708.
- [ 25 ] 梁伟,黎兴强,陈志雄,等.医学领域微小力值传感测量技术的研究进展 [ J ]. *机电工程*, 2024, 41(11): 2068-2086.
- LIANG W, LI X Q, CHEN ZH X, et al. Research progress in micro force sensing measurement technology in medical field [ J ]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2024, 41(11): 2068-2086.
- [ 26 ] XU S Y, LI X ZH, WANG T Y, et al. Fiber Bragg grating pressure sensors: A review [ J ]. *Optical Engineering*, 2023, 62(1): 010902.
- [ 27 ] 王元锋,何彦霖,周康鹏,等.变构型飞行器蒙皮多维大尺度变形重构方法 [ J ]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(4): 197-205.
- WANG Y F, HE Y L, ZHOU K P, et al. Variant aircraft



- skin multidimensional large-scale deformation reconstruction method [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(4) : 197-205.
- [ 28 ] SU H, IORDACHITA I I, TOKUDA J, et al. Fiber-optic force sensors for MRI-guided interventions and rehabilitation: A review [ J ]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(7) : 1952-1963.
- [ 29 ] GAN L, DUAN W K, AKINYEMI T O, et al. Development of a fiber Bragg grating-based force sensor for minimally invasive surgery-case study of Ex-Vivo tissue palpation [ J ]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-12.
- [ 30 ] ZHANG H, YI H R, FAN ZH B, et al. An FBG-based 3-DOF force sensor with simplified structure for retinal microsurgery[ J ]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(15) : 14911-14920.
- [ 31 ] 于昌新,何彦霖,祝连庆,等. 光纤传感微创手术探针末端三维力测量方法 [ J ]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1) : 38-45.
- YU CH X, HE Y L, ZHU L Q, et al. Three-dimensional end-force measurement method of optic fiber sensing minimally invasive surgical probe[ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1) : 38-45.
- [ 32 ] SMITS J, OURAK M, GJJBELS A, et al. Development and experimental validation of a combined FBG force and oct distance sensing needle for robot-assisted retinal vein cannulation[ C ]. 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation ( ICRA ). IEEE, 2018: 129-134.
- [ 33 ] SHI CH Y, LI T L, REN H L. A millinewton resolution fiber Bragg grating-based catheter two-dimensional distal force sensor for cardiac catheterization[ J ]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(4) : 1539-1546.
- [ 34 ] DENG Y N, YANG T W, LOU B X, et al. A sensitivity difference approach to overcome temperature influence on a fiber optic force sensor with a pair of FBGs [ J ]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, 342: 113645.
- [ 35 ] LOU Y Y, YANG T Y, LUO D, et al. A novel catheter distal contact force sensing for cardiac ablation based on fiber Bragg grating with temperature compensation [ J ]. Sensors, 2023, 23(5) : 2866.
- [ 36 ] NAGHIBI H, HOITZING W B, STRAMIGIOLI S, et al. A flexible endoscopic sensing module for force haptic feedback integration [ C ]. 2018 9th Cairo International Biomedical Engineering Conference ( CIBEC ). IEEE, 2019: 158-161.
- [ 37 ] XUE R F, REN B Y, HUANG J Q, et al. Design and evaluation of FBG-based tension sensor in laparoscope surgical robots[ J ]. Sensors, 2018, 18(7) : 2067.
- [ 38 ] LAI W J, CAO L, XU ZH L, et al. Distal end force sensing with optical fiber Bragg gratings for tendon-sheath mechanisms in flexible endoscopic robots [ C ]. 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation ( ICRA ). IEEE, 2018: 5349-5355.
- [ 39 ] LAI W J, CAO L, TAN R X, et al. Force sensing with 1 mm fiber Bragg gratings for flexible endoscopic surgical robots[ J ]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(1) : 371-382.
- [ 40 ] LAI W J, CAO L, LIU J J, et al. A three-axial force sensor based on fiber Bragg gratings for surgical robots[ J ]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(2) : 777-789.
- [ 41 ] SHI CH Y, LI M, LYU CH H, et al. A high-sensitivity fiber Bragg grating-based distal force sensor for laparoscopic surgery [ J ]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(5) : 2467-2475.
- [ 42 ] LI K, ZHUO Y, LI D J, et al. Miniature 6-axis force/torque sensor based on a Stewart platform and FBG sensing for endoscopic surgery [ J ]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(9) : 13968-13979.
- [ 43 ] LI T L, HUANG P AN, WANG SH SH, et al. A six-axis FBG force/moment sensor with nonlinear decoupling and fault tolerance for laparoscopic instruments [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(10) : 13384-13394.
- [ 44 ] DENG Y N, YANG T W, DAI SH T, et al. A miniature triaxial fiber optic force sensor for flexible ureteroscopy[ J ]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2021, 68(8) : 2339-2347.
- [ 45 ] WANG L Y, GAO Y ZH, ZHANG Y X, et al. A novel 3-D force perception structure based on fiber Bragg grating for surgical robots[ C ]. 2022 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation ( ICMA ). IEEE, 2022: 1662-1667.
- [ 46 ] LI J H, WANG CH Y, MAO ZH Y, et al. A compact FBG-based triaxial force sensor with parallel helical

- beams for robotic-assisted surgery[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 7503709.
- [47] SUN K, LI M, WANG SH X, et al. Development of a fiber Bragg grating-enabled clamping force sensor integrated on a grasper for laparoscopic surgery [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(15): 16681-16690.
- [48] WANG F W, JIANG Q, ZHANG Y X, et al. A miniature triaxial force sensor based on fiber Bragg gratings for flexible endoscopic robot[J]. *Measurement*, 2024, 232: 114645.
- [49] ZHANG Y X, JIANG Q, WANG F W, et al. Tac-scope: An endoscope integrated with soft sensor for real-time tactile feedback[J]. *Measurement*, 2024, 235: 114953.
- [50] XU L, FEUERMAN L A, GE J, et al. Temperature-insensitive contact force sensing in bi-directional catheter using fiber Bragg grating pair[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(16): 5118-5122.
- [51] HE CH B, WANG SH X, ZUO S Y. A linear stepping endovascular intervention robot with variable stiffness and force sensing [J]. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2018, 13(5): 671-682.
- [52] GAO AN ZH, ZHOU Y Y, CAO L, et al. Fiber Bragg grating-based triaxial force sensor with parallel flexure hinges[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(10): 8215-8223.
- [53] LI T L, SHI CH Y, REN H L. Three-dimensional catheter distal force sensing for cardiac ablation based on fiber Bragg grating [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(5): 2316-2327.
- [54] LI T L, PAN AN Q, REN H L. A high-resolution triaxial catheter tip force sensor with miniature flexure and suspended optical fibers[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(6): 5101-5111.
- [55] LI T L, ZHAO Z B, GUO J X, et al. Wavelength-phase hybrid coded catheter tip three-axis force optical fiber sensor with uncertain environment self-adaptivity [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2024, 29(6): 4144-4155.
- [56] AKINYEMI T O, OMISORE O M, DUAN W K, et al. Development of a millinewton FBG-based distal force sensor for intravascular interventions [C]. 2020 16th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV). IEEE, 2020: 511-515.
- [57] SHIN D, KIM H U, KULKARNI A, et al. Development of force sensor system based on tri-axial fiber Bragg grating with flexure structure [J]. *Sensors*, 2021, 22(1): 16.
- [58] TAGHIPOUR A, CHEEMA A N, GU X J, et al. Temperature independent triaxial force and torque sensor for minimally invasive interventions [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(1): 449-459.
- [59] GAN L, WANG J B, XIE L H, et al. A high precision triaxial force sensor based on fiber Bragg gratings for catheter ablation[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 1-11.
- [60] ABUSHAGUR A A G, BAKAR A A A, BIN ZAN M S D, et al. A novel technique employing tapered fiber Bragg grating to solve the axial/transverse forces crosstalk in microsurgical instruments[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(21): 7671-7680.
- [61] ABUSHAGUR A A G, ARSAD N, ELGAUD M M, et al. Development of a 1-DOF force sensor prototype incorporating tapered fiber Bragg grating for microsurgical instruments [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 168520-168526.
- [62] GAO AN ZH, GONENC B, GUO J ZH, et al. 3-DOF force-sensing micro-forceps for robot-assisted membrane peeling: Intrinsic actuation force modeling[C]. 2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob). IEEE, 2016: 489-494.
- [63] GONENC B, GEHLBACH P, HANDA J, et al. Motorized force-sensing micro-forceps with tremor cancelling and controlled micro-vibrations for easier membrane peeling[C]. 5th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics. IEEE, 2014: 244-251.
- [64] GONENC B, CHAMANI A, HANDA J, et al. 3-DOF force-sensing motorized micro-forceps for robot-assisted vitreoretinal surgery[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(11): 3526-3541.
- [65] PATEL N, URIAS M, EBRAHIMI A, et al. Sclera force evaluation during vitreoretinal surgeries in ex vivo porcine eye model[C]. 2019 IEEE Sensors. IEEE, 2019: 1-4.

- [66] EBRAHIMI A, ALAMBEIGI F, SEFATI S, et al. Stochastic force-based insertion depth and tip position estimations of flexible FBG-equipped instruments in robotic retinal surgery[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021, 26(3): 1512-1523.
- [67] XU B X, KO S Y. Novel force sensing module for a concentric tube-based vitreoretinal surgical robot[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 316: 112395.
- [68] ZHANG T C, CHEN B J, ZUO S Y. A novel 3-DOF force sensing microneedle with integrated fiber Bragg grating for microsurgery[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(1): 940-949.
- [69] ZHANG H, WANG CH B, BAI M, et al. A micro-3-degree-of-freedom force sensor for intraocular dexterous surgical robots[J]. Advanced Intelligent Systems, 2023, 5(7): 2200413.
- [70] ZHANG X D, LIU H CH, WANG Y CH, et al. FBG-based three-dimensional micro-force sensor with axial force sensitivity-enhancing and temperature compensation for micro-forceps[J]. Optics Express, 2023, 31(24): 40538-40556.
- [71] AMBASTHA S, UMESH S, DABIR S, et al. Spinal needle force monitoring during lumbar puncture using fiber Bragg grating force device[J]. Journal of Biomedical Optics, 2016, 21(11): 117002.
- [72] XIONG P W, HUANG X, LI Y L, et al. A fiber Bragg grating sensing structure for the design, simulation and stress strain monitoring of human puncture surgery[J]. Sensors, 2019, 19(14): 3066.
- [73] LI X, LIN J ZH, PANG Y, et al. Three-dimensional force sensor based on fiber Bragg grating for medical puncture robot[C]. Photonics, 2022, 9(9): 630.
- [74] 王凯瑶. 基于 MEMS 三维力传感器的机器人辅助微创手术触诊探头研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2023.  
WANG K Y, Research of palpation probe based on MEMS 3D force sensor for robotic-assisted minimally invasive surgery[D]. Suzhou: Soochow University, 2023.
- [75] LI T L, SHI CH Y, REN H L. A high-sensitivity tactile sensor array based on fiber Bragg grating sensing for tissue palpation in minimally invasive surgery[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(5): 2306-2315.
- [76] LI T L, PAN AN Q, REN H L. Reaction force mapping by 3-axis tactile sensing with arbitrary angles for tissue hard-inclusion localization[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2021, 68(1): 26-35.
- [77] LYU CH H, WANG SH X, SHI CH Y. A high-precision and miniature fiber Bragg grating-based force sensor for tissue palpation during minimally invasive surgery[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2020, 48(2): 669-681.
- [78] WU Z C, GAO AN ZH, LIU N, et al. FBG-based triaxial force sensor integrated with an eccentrically configured imaging probe for endoluminal optical biopsy[C]. 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2020: 1625-1631.

### 作者简介



鲁国志, 2020 年于上海第二工业大学获得工学学士学位, 现为北京信息科技大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感系统。

E-mail: lg\_will@163.com

**Lu Guozhi** received his B. Sc. degree from Shanghai Polytechnic University in 2020. He is currently a master student at Beijing Information Science and Technology University. His main research interest includes optical fiber sensing systems.



何彦霖(通信作者), 2011 年于兰州交通大学获得工学学士学位和文学学士(双学位), 2018 年于北京理工大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授、博士生导师, 光电测试技术及仪器教育部重点实验室副主任。主要研究方向为光纤传感与机器人智能导航技术、红外探测与超表面增强技术等。

E-mail: heyanlin@bistu.edu.cn

**He Yanlin** (Corresponding author) received her B. Eng. and B. A. from Lanzhou Jiaotong University in 2011, and Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2018. She is currently a professor and a Ph. D. supervisor at Beijing Information Science and Technology University, and the deputy director of the Key Laboratory of Optoelectronic Measurement Technology and Instruments of the Ministry of Education. Her main research interests include optical fiber sensing and robot intelligent navigation technology, infrared detection and metasurface-enhanced technology, etc.