

光纤 Bragg 光栅力觉传感器在健康医疗领域的应用

李红豪^{1 2}, 龙建勇^{1 2 3}, 成乐凯^{1 2 3}, 梁桥康^{1 2 3*}

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院 湖南 长沙 410082; 2. 机器人视觉感知与控制技术国家工程研究中心 湖南 长沙 410082;
3. 电子制造业智能机器人技术湖南省重点实验室 湖南 长沙 410082)

摘要: 在微创手术等现代医疗过程中普遍存在力触觉反馈缺失、健康体征监测系统有待完善和提升等问题,使得力触觉感知成为了机器人领域中热门的研究方向。传统的电学类传感器存在明显的体积大和生物相容性差等问题,难以直接应用于微创手术等场景。光纤 Bragg 光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感技术因其抗电磁干扰能力强、生物相容性高、带宽宽和尺寸小等特点,正被广泛应用于健康医疗领域。主要介绍了 FBG 力觉传感器的工作原理及其传感特性,详细叙述了国内外基于 FBG 的力触觉传感器在健康医疗方面的研究现状和应用情况,并展望了光纤光栅式力觉传感技术在健康医疗领域的发展趋势。

关键词: 机器人传感器; 光纤 Bragg 光栅; 力触觉传感; 生命体征检测; 分布式柔性传感器

中图分类号: TP212 文献标志码: A 文章编号: 1000-8829(2023)04-0009-13

doi: 10.19708/j.ckjs.2022.05.253

Application of Fiber Bragg Grating Force Sensors in Health Care and Medical Treatment

LI Honghao^{1 2}, LONG Jianyong^{1 2 3}, CHENG Lekai^{1 2 3}, LIANG Qiaokang^{1 2 3*}

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. National Engineering Laboratory for Robot Visual Perception and Control Technology, Changsha 410082, China;

3. Hunan Key Laboratory of Intelligent Robot Technology in Electronic Manufacturing, Changsha 410082, China)

Abstract: Due to the lack of force-tactile feedback in modern medical procedures such as minimally invasive surgery and the need to improve the system of vital signs monitoring(VSM), the effective force-tactile perception is becoming a popular research direction in the field of robotics. Traditional electrical sensors have obvious problems such as large size and poor biological compatibility, which makes it difficult to be directly applied to minimally invasive surgery. Fiber Bragg grating (FBG) sensing technology is widely used in the field of health care and medical treatment because of its strong capability of anti-electromagnetic interference, good biocompatibility, wide bandwidth and small size. The working principle and sensing characteristics of FBG sensors are introduced, then the research status and application of force-tactile sensor based on FBG sensing principle in health care and medical treatment at home and abroad are described in detail. The development trend of FBG sensing technology in health care and medical treatment field in the future is prospected.

Key words: robot sensors; fiber Bragg grating; force-tactile sensor; vital signs monitoring; distributed flexible sensors

收稿日期: 2022-03-23

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB4703103); 国家自然科学基金(62073129, U21A20490); 湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ10020)

引用格式: 李红豪, 龙建勇, 成乐凯, 等. 光纤 Bragg 光栅力觉传感器在健康医疗领域的应用[J]. 测控技术, 2023, 42(4): 9-21.

LI H H, LONG J Y, CHENG L K, et al. Application of Fiber Bragg Grating Force Sensors in Health Care and Medical Treatment [J]. Measurement & Control Technology, 2023, 42(4): 9-21.

在医疗领域中实现力反馈的重要现实原因是借助医疗器械进行手术时缺乏直接的力触觉感知,尤其是在微创手术过程中,外科医生无法通过观察组织变形的视觉反馈来估计施加在有机组织上的力^[1],这就会导致手术过程中施加的力过大对组织造成损伤,而施加的力不足又会导致组织滑移,同时后者还涉及组织位于夹钳中的位置问题。在目前较为成熟的腹腔镜胆囊切除术中,56%的手术失误是由于施加过大或不足的力量造成的^[2]。因此,在手术夹钳中引入力触觉检测就显得尤为重要。通过传感装置建立力触觉反馈,外科医生就可以准确地感知作用在组织上的力和组织被加持的位置,从而进行精准的手术操作,改善了手术的质量。为了解决手术过程中缺乏力反馈的问题,研究人员最初使用技术较为成熟的高精度商用 ATI(Ar-

ray Technology Industry Inc.) 力传感器来检测施加在组织上力的大小。虽然这一类传感器技术较为成熟、成本低且测量维数广,但因其尺寸较大,难以与手术器械集成^[3],因此这种设计只能应用于设计验证和离体实验中。除此之外,研究人员还设计了基于电阻、电容、压电等原理的医用传感器^[4-6],这些典型传感技术的优缺点及典型应用如表 1 所示。总的来说,这类电学传感元件的典型原型存在灵敏度低、测量范围有限、抗电磁干扰能力和生物相容性差等缺点,使其应用在医疗领域中具有挑战性。同时由于传感元件的尺寸限制,使设计的夹钳的尺寸较大,其工作原理对外科手术标准流程的干扰较大,难以与手术器械集成,在潮湿、易燃、易爆等恶劣的工作环境中应用受到限制,难以在医疗领域推广。

表 1 典型传感技术的优缺点及典型应用

传感器类型	原理描述	优点	缺点	典型应用
电阻传感器	利用应变片等元件电阻值变化来实现非电量测量的装置	<ul style="list-style-type: none"> • 精度高 • 测量范围广 • 使用寿命长 • 结构简单 • 频响特性好 	<ul style="list-style-type: none"> • 非线性 • 输出信号弱 • 功耗高 • 可重复性低 • 窄频带宽 	文献[7]~文献[10]
电容传感器	利用电容随面积、极距和介质等的变化而变化的性质来实现非电量测量的装置	<ul style="list-style-type: none"> • 结构简单 • 温度稳定性好 • 具有平均效应 • 动态响应性好 • 灵敏度和分辨率高 	<ul style="list-style-type: none"> • 输出非线性 • 杂散电容 • 温度敏感 • 边缘效应 	文献[3]、 文献[11]~文献[14]
压电传感器	利用某些压电材料受力后表面产生电荷的性质来实现非电量测量的装置	<ul style="list-style-type: none"> • 频带宽 • 信噪比高 • 结构简单 • 工作可靠 	<ul style="list-style-type: none"> • 输出的直流响应差 • 工作环境要求高 	文献[15]~文献[17]
压阻传感器	利用半导体材料的压阻效应实现非电量测量的装置	<ul style="list-style-type: none"> • 频率响应高 • 灵敏度高 • 可靠性高 • 体积小 	<ul style="list-style-type: none"> • 信噪比低 • 结构复杂 • 温度误差大 • 不能检测静态力 	文献[18]~文献[20]
光电传感器	利用光电效应将光信号转换为电信号实现非电量测量的装置	<ul style="list-style-type: none"> • 非接触式测量 • 响应快 • 性能可靠 • 检测距离长 	<ul style="list-style-type: none"> • 环境适应性差 • 容易被污染失效 • 成本较高 	文献[21]~文献[23]

新型材料技术和光纤传感技术的同步发展加快了生物医学和仿生力触觉感知等热点学科对光纤光栅传感器的需求。光纤光栅具有不受电磁干扰、损耗低、易弯曲、体积小、质量轻、成本低、防水性好和生物相容性高等固有优点^[24-25],对温度和应力等重要测量参数具有极高的测量精度和线性度。此外,光纤光栅迟滞低、无源、具有充足的测量范围和核磁共振兼容性强等特性也使光纤光栅适用于健康医疗领域^[26]。基于以上优点可以预见,光纤光栅传感器将在健康医疗领域有着广泛的应用。本文概述了基于光纤 Bragg 光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)的传感技术在健康医疗领域的应用和前景,重点介绍了用于测量医学物理参数(即

力、应变、温度和位置)的传感器。

1 FBG 传感原理

光纤光栅是一种光无源器件,其传感原理是基于光纤中纤芯折射率的周期性调制^[27]。当一束光射入 FBG 时,只有波长满足 Bragg 条件的光波才会被反射,称为 FBG 反射谱中心波长,其传感原理如图 1 所示。图 1 中反射信号即为光纤光栅光谱信号,通过测量反射信号相对光强可以得出光纤光栅反射谱中心波长值。根据耦合模型理论^[28],光纤光栅的中心波长 λ_B 为^[29]

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

式中: n_{eff} 为光纤光栅的有效折射率; Λ 为栅格周期。由此可知, 光纤光栅的中心波长的变化主要受 n_{eff} 和 Λ 的变化控制, 即光纤光栅的有效折射率与栅格周期发生变化会引起其中心波长发生相应变化。

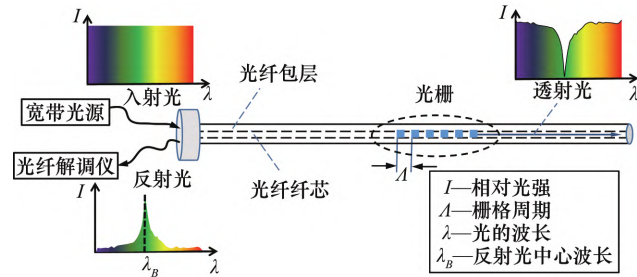


图1 FBG 传感原理

1.1 FBG 的温度传感特性

由 FBG 传感原理可知, 外界温度和应力通过影响 n_{eff} 和 Λ 使光纤光栅中心波长发生偏移^[30]。温度对光纤光栅反射谱中心波长的影响主要是由于光纤材料存在热光效应和热膨胀效应, 即温度的变化会引起光纤纤芯的有效折射率和光栅的周期发生变化。在仅考虑温度影响的作用下, 光纤光栅中心波长受到温度和应变的影响时其偏移量为^[31]

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi) dT \quad (2)$$

式中: α 与 ξ 之和即为 FBG 的温度灵敏度系数, 一旦光栅被刻写好, 光栅对温度的灵敏度基本上也就确定为一个定值。研究表明, FBG 的中心波长漂移量与温度改变具有很好的线性关系^[32]。

1.2 FBG 的应力传感特性

应力和应变是影响光纤光栅中心波长漂移的重要因素之一。光纤在工作时无论是受到挤压还是拉伸, 都将直接导致光栅周期发生变化, 同时光纤材料的弹光效应也会改变纤芯有效折射率。这 2 种变化都会导致光栅反射光谱的中心波长发生漂移, 在不考虑温度对光纤光栅产生影响的前提下, 轴向应变引起的光纤光栅中心波长的影响为^[33]

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) \Delta\varepsilon \quad (3)$$

式中: P_e 为光纤光栅的有效弹光系数, 是只与材料系数相关的常数; $\Delta\varepsilon$ 为光纤光栅的轴向应变。因此反射波长的中心波长与应变具有很好的线性关系, 这样的特点保证了 Bragg 光栅作为轴向应变传感器具有稳定性。

1.3 FBG 交叉敏感特性

通过解调出光纤光栅中心波长的偏移量, 就可以推测出外界温度和应变的变化量, 其他物理量(如压力和位移等)都可以通过解调中心波长的偏移量推算出来^[34]。在实际的应用中, 外界温度和应变会共同作

用于光纤光栅, 光栅的周期长度和折射率都会随着这 2 个因素而发生变化。根据上述分析可知, 光纤光栅反射光中心波长的偏移量与温度和应变都存在很好的线性关系, 由叠加性可知, 在两者共同作用于同一段光栅时, 中心波长的偏移量对应变和温度的依赖性可以描述为^[27]

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) \Delta\varepsilon + (\alpha + \xi) dT \quad (4)$$

这种情况在工程中也称为光纤光栅的温度-应变交叉敏感。为了精确获得触觉传感的信息, 在信号处理时一个重要的操作是进行信号解耦, 使两者区分开来, 如常见的温度补偿操作能够提高传感器对应力的检测精度, 从每个波长偏移值中减去总的波长偏移平均值以去除噪声、轴向应变和温度分量等干扰量^[35], 从而降低所需测量值的测量误差等。

2 FBG 在健康医疗领域的应用

Bandari 等^[36]研究回顾了自 2000 年以来有关传感原理、设计要求和规范的相关文献后提出: 传感器尺寸、测量范围、分辨率、无源性和磁共振兼容性是研究医用触觉传感器的关键因素。基于电学的传感技术难以同时满足这些要求, 使其在健康医疗领域的应用中具有挑战性。不少专家学者开始着眼于寻找新的合适的传感器元件。光纤传感器因其具有体积小、灵活性强、生物相容性好、对人体内部环境有较强的抗腐蚀能力、具有良好的抗灭菌和电磁干扰能力、适用于高温/高压和强电磁环境下的医疗用途等突出优点, 被越来越多地应用于健康医疗领域。表 2 为 Web of Science(WOS) 等在线数据库中以“光纤光栅传感器 & 医疗”为关键词的检索文章数量。在过去几十年的学术研究中, 每 10 年发表的关于 FBG 医用传感器的论文数量反映了过去几十年研究的稳步增长趋势。可以明显注意到, 基于 FBG 的医用传感系统文章发表率的大幅提升证明了该技术的快速发展, 其数量级的快速增长反映了基于 FBG 的医用传感系统的成熟度。

表 2 1990 年以来关于 FBG 医用传感器的已发表论文数量

年份	IEEE	WOS	ASME	SpringerLink	中国知网
1990—2000	3	2	0	0	0
2001—2010	14	27	3	2	0
2011—2020	144	242	38	27	14
2021 至今	42	48	5	4	2

2.1 FBG 在医疗领域的应用

随着医疗辅助器械的普及, 微创手术正在影响传统医疗行业。限制微创手术(Minimally Invasive Surgery, MIS) 普及和发展的重要原因是手术过程中无法

测量所抓取物体的力的大小,以及没有合理指标来量化组织的柔软度。当前 MIS 技术的另一个主要缺点是无法测量被抓物体中力的局部分布,而传感器检测和定位集中负荷的能力在 MIS 中是非常重要和有益的。因此, Sokhanvar 等^[37]提出未来的手术工具应该由传感器来感知触觉特性,例如对组织弹性的测量,从而区分不同种类的组织类型。然而,开发一种配备触觉传感器的手术器械仍具有许多挑战。目前,国内外学者都在尝试使用各种传感技术将传感器直接安装在末端执行器上,包括位移、压力、电阻、电容、压电和振动等特性的传感器^[38]。由于上述传统的电类传感元件存在尺寸与精度之间的互相限制,导致目前符合医用标准的传感器尺寸偏大,难以适应微创手术的需求,同时对于电子和结构复杂的传感器来说,灭菌、抗电磁干扰和生物相容性等问题也是其难以实用化的重要因素。

近些年来,随着光纤光栅技术的发展和普及,研究者们找到了很好的传感元件替代品。FBG 传感器具有体积小、灵敏度高、生物相容性好、抗电磁噪声和无源性等适合医疗用途的突出优点,被越来越多地应用于医疗领域。

2.1.1 在微创手术方面的应用

与传统开放式手术相比,微创手术具有创伤小、疼痛轻和恢复快等优点,越来越受到人们的追捧。但现阶段微创手术主要依靠外科医生操作设备来操纵手术器械,缺乏远端夹持力反馈将使外科医生难以正确感知相互作用力或估计组织特性。据报道,没有力反馈通常会增加施加在组织上的平均力大小^[39]。为了克服这个问题,许多研究小组已经为微创手术设计了力传感系统。由于 FBG 相比于传统电学传感元件在生物相容性方面具有显著的优点,有望成为微创手术中力觉传感研究的新方向。

天津大学的 Sun 等^[40]使用 FBG 设计了一种一维夹持力传感器,为腹腔镜手术提供交互力反馈,微创腹腔镜手术抓取器结构如图 2 所示。为了有效地减小传感器尺寸, Sun 等提出了一种新的传感器实施方案,即通过力敏桥式机构将施加在抓取表面上的垂直力或位移线性转换为沿弯曲中心线的水平变形。该设计克服了传统夹持力传感器设计对抓取位置敏感的缺点,实现了在测量范围 0~10 N 内具有 17.8 mN 的分辨率,同时能够区分不同硬度的组织块。

南方医科大学的 Wang 等^[41]也提出了一种在腹腔镜抓取器尖端集成 FBG 传感器的力觉传感器,用于在腹腔镜手术中提供实时力反馈。该传感器显著降低了新手医生在手术时产生的夹持力波动,从而在腹腔镜术中夹持时具有更好的稳定性,传感器原型具有 0.076 nm/N 的力灵敏度,可重复精度为 0.118 N。该

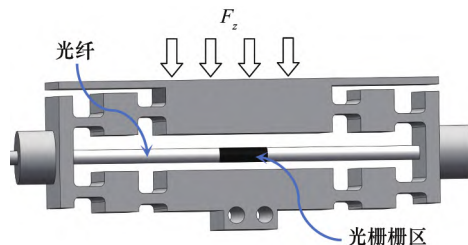


图 2 微创腹腔镜手术抓取器示意图^[40]

项研究验证了基于 FBGs 的力觉阵列传感器设计的可行性。

新加坡的 Lai 等^[42]开发了一种使用 1 mm FBG 检测柔性内窥镜手术机器人中腱鞘机构(TSM)的远端力的新型力传感器,展现了 FBG 传感器在 TSM 驱动的机器人抓取器和肌腱驱动连续体机器人中的应用。该研究还对 FBG 力觉传感器进行温度补偿,以提升其灵敏度。结果表明,该力传感器的测量误差为 0.178 N,灵敏度为 34.14 pm/N。Song 等^[43]也开发了一种灵活且可消毒的 FBG 力传感器系统,其分辨率为 0.1 N,测量误差低于 0.1 N,测量范围高达 10 N,为开发高精度、大量程和可重复使用微创手术机器人传感器指明了方向。

目前,大量研究工作致力于在微创手术中引入 FBG 传感器进行力反馈,其中不乏有在动物组织上实验的先例^[40],这充分证明了使用 FBG 传感器进行力觉感知和组织区分的可行性。同时,由于 FBG 具有良好的无源性、抗电磁干扰能力和生物相容性,也为心血管干预操作力反馈^[44]和磁共振兼容传感器^[45]的设计提供了思路。在这种情况下,FBG 传感器可用于提供施加到患者组织上的力的反馈信息,以避免在手术期间损坏组织。

2.1.2 在组织触诊方面的应用

触觉感知是生物体的基本功能^[31]。在开放手术期间,医生可以通过手指触觉去感知器官的异常情况,进而判断器官中是否存在肿瘤和肿块并对其进行定位。但在现代手术过程中,由于对手术切口大小的限制,往往无法实现直接接触,需要借助器械进行间接触诊。在这种情况下,外科医生不能直接获取触觉提示,只能依靠手术工具来感知。在临床机器人辅助微创手术中,外科医生只能远程操控手术机器人,医生的触觉感知与医疗现场的情况几乎完全不同,因此开发适用于直接组织触诊的医疗器械也是当前的研究热点。目前,基于 FBG 传感原理的组织触诊的应用包括但不限于癌症筛查、组织硬包裹体定位和心脑血管干预。

在癌症筛查方面,组织弹性被普遍认为是癌症的诊断和预后生物标志物,癌变组织通常比周围组织硬且根据患病的器官表现出不同的硬度^[46]。新加坡国

立大学的 Li 等^[47]提出了一种基于 FBG 的新型高灵敏度光学触觉传感器阵列,用于在微创手术中探索和定位组织触诊过程中的组织异常。经表面估计实验和对嵌入模拟肿瘤的硅胶体模进行体外触诊验证了所提出设计的有效性,体外实验证明了其检测嵌入深度达 8 mm 的肿瘤的出色能力。意大利的 Iele 等^[48]根据癌变部位与周围正常组织间的弹性差异设计了一款基于光纤技术的微型传感器,能够以亚毫米分辨率测量组织弹性,如图 3 所示,从而实现了对前列腺组织病变情况的检测。该传感器的光学探头由定制的 FBG 制成,用于测量在特定组织点压痕过程中作用在其尖端的力,灵敏度约为 1 nm/N。研究人员首先在硅胶膜和模拟前列腺癌不同阶段的模型组织上进行了验证,随后对从患者获得的真实前列腺进行了离体测试。初步结果表明,该传感器能够区分健康和患病的前列腺,并可以识别早期出现的亚毫米大小的前列腺癌。

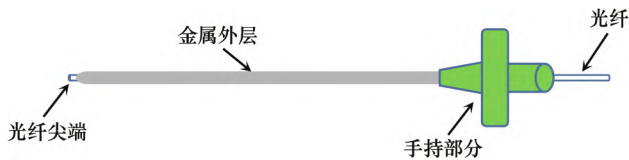


图 3 用于前列腺组织触诊的光纤微型传感器^[48]

有研究报告称^[49-50],在 MIS 期间可以通过使用具有力感应能力的触诊仪器在术中发现和检测埋藏的硬包裹体,触诊器械可以通过感测到的表面反作用力和组织轮廓来改善外科手术的效果并进行病理评估。由于硬包裹体的硬度或刚度大于周围的健康组织^[51],新加坡国立大学的 Li 等^[52]提出了一种基于 FBG 的三轴触觉传感器,用于组织硬包裹体的表面反作用力映射、识别和定位。该传感器探头部分使用 5 个 FBG 传感元件,但其触觉传感器探头直径仅 4 mm,FBG 部署在 3D 打印的可变形体内,以检测探头和组织之间的三轴相互作用力。由于其具有三轴力感应能力,这种设计可支持具有任意接触角的连续拖动,与单轴触诊力传感器相比,这种优点可以提高触诊效率和对组织曲面的适应性。结果表明,该探针可以有效地从力映射中识别出这些小的硬夹杂物的存在和位置。此外,可以通过任意接触角的拖动触诊来准确识别嵌入体模中的长血管。此探针的另一个新颖之处是可重建非平面组织的表面轮廓,这进一步实现了硬夹杂物识别和 3D 定位。该项研究还使用猪肾脏的离体组织触诊进一步验证了探针在术中绘制表面反作用力和定位硬包裹体的有效性和可行性。

Polygerinos 等^[53]为解决心导管插入术这种介入手术过程中医生并不总能预测导管和血管壁之间的力,使移动导管通过脆弱的血管网络和心腔等任务变

得困难的问题,开发了一种能够提供触觉反馈的用于心脏导管的触觉传感器。此研究为有关手动和机器人导管插入方法提供了参考,通过对当前最先进的用于导管的光纤力和压力传感器进行讨论,验证了 FBG 传感器能够为此类手术过程提供触觉信息的可行性。新加坡的 Li 等^[54]设计了一种用于抽吸器械与组织接触时的触觉反馈系统,提出将 4 根刻有 FBG 的悬挂光纤分别固定在三维印刷弹性体的两端,以同时感应和解耦力/扭矩引起的隔膜变形,从而输出类似人体触觉感知的力反馈信号,以减小抽吸操作时因施加的轻微过载所导致的对柔软、脆弱和复杂的大脑结构的医源性损伤。

陕西科技大学的甘露等^[55]提出一种用于微创手术组织触诊中的高灵敏度 FBG 传感方案,传感器原型采用高弹性的螺旋结构,研究通过标定实验建立输入量力与输出量波长偏移量之间的关系,目的是解决手术期间医生无法直接接触人体组织和缺乏精确的力反馈信息的问题。天津大学的 Lyu 等^[56]也开发了一种用于微创手术组织触诊的高精度微型 FBG 力传感器,传感器原型呈圆柱形,直径为 5 mm,长为 19 mm。该传感器能够在 0~5 N 的相对较大的测量范围内实现 2.55 mN 的高分辨率轴向力检测。

2.1.3 在形状感知方面的应用

当 FBG 曲线传感器的终端位置和形状检测特性用于医学时,FBG 曲线传感器的定位精度在疾病的预诊断和治疗中至关重要^[57]。近年来,在无创和微创医学领域,探针、导管、内窥镜和连续体机器人等智能医疗器械通常被用作检查的辅助工具,但医生在诊疗过程中无法直接观察各种手术工具在人体内的形状。因此,FBG 传感器作为一种新兴的形状重建和尖端定位技术,能够提供实时的力测量和形状估计,而无须基于运动学的建模。这些传感器还支持与连续体机器人轻松集成,并为大多数手术环境提供高生物相容性,受到越来越多的关注。

Park 等^[58]首次将 FBG 传感引入兼容 MRI (Magnetic Resonance Imaging, 磁共振成像) 的小型活检针中,以实现偏转剖面的实时形状估计。这种三重形状传感器由嵌入 2 个 FBG 传感器阵列节点的 3 根光纤组成,并沿着针表面上的 3 个凹槽放置。每个节点都有 1 个三角形配置,由 3 个 FBG 传感器组成,这些传感器以 120° 的相等间隔分布,并沿着针分布在不同的位置。Henken 等^[59]采用了具有 2 组 FBG 传感器的相同配置并沿套管针连接,用于肝肿瘤消融,但使用了不同的传感器放置位置。具有欧拉积分的 Frenet-Serret 公式将曲率信息转换为形状轮廓,并在自由空间中产生 1.1 mm 的平均尖端精度和高达 12.5 mm 的尖端

偏转。Moon 等^[60]提出了一种高度灵活的形状传感棒,3 个 FBG 传感器呈三角形放置,直径小于 900 μm ,可应用于微创手术系统,可在确保弯曲操作达 90° 的情况下以 3.74 Hz 的采样率进行实时形状检测,探头位置的平均误差为传感器总长度的 1.50%。Roesthuis 等^[61]提出使用 3 根光纤,每根光纤嵌入 4 组 FBG 传感器。这种设计支持沿针轴在更多位置测量曲率信息,且已经在自由空间和软组织模拟器(明胶体模)中进行了偏转实验。研究表明,这种形状重建结果能够在 3D 工作空间内实现可操纵的镍钛合金针和肌腱驱动针的实时闭环控制,以访问软组织模型中的目标部位。

在使用 FBG 进行形状感知方面,Shi 等^[62]提出,基于光纤光栅传感的形状重建包括单个光纤配置、正交配置和三角形配置嵌入式光纤光栅传感器。三角形结构的三重设计支持温度补偿,能够消除常见的噪声和轴向应变,并可测量扭转角度,可以实现更好的力感知和形状估计精度。基于光纤光栅传感的形状重建技术主要依赖于曲率估计,曲率估计与波长位移计算的应变有关。这些技术已经越来越多地被应用于小变形的连续体机器人,例如可操作的介入针活检和消融。上海大学的 Chen 等^[57]为了提高形状重建精度,使用 2 种基于 Frenet 坐标系单点递归重建算法的误差累积的更新重建算法,进一步验证了采用多点 FBG 用于形状感知和空间曲线重建的可行性。

2.1.4 在其他医疗方面的应用

视网膜显微手术需要对视网膜组织进行极其精细的操作,其中工具与组织的相互作用力通常低于人类感知的阈值。美国的 Iordachita 等^[35]为满足视网膜显微外科手术期间需要高精度力反馈的需求,在直径仅 0.5 mm 的工具轴上嵌入 3 根长 1 cm、直径 160 μm 的 FBG 来感应巩膜内部的远端力,3 根光纤围绕工具轴的圆周以 120° 间隔排列。该力传感原型具有 X 和 Y 共 2 个自由度,且测力分辨率可达 0.25 mN,该研究采用了一种能够消除环境温度波动和轴向应力干扰的算法,避免了 FBG 交叉敏感和轴向力信号耦合的问题。天津大学的 Zhang 等^[63]采用类似的方法,研发了一种用于显微外科手术的具有集成 FBG 的新型 3 自由度力传感微针,此传感原型可以分别以 0.124 mN 和 0.74 mN 的分辨率实现横向力和轴向力的测力。根据设计规范,该力传感器的长度不超过 15 mm,最大外径为 1.1 mm,能以较高的分辨率检测 7.5 mN 以下的力,基本满足视网膜显微手术中对力反馈的需求。

赵臻^[64]全面综述了光纤光栅传感技术在口腔研究领域的方法和应用价值,分析了 FBG 传感器在口腔生物力学监测、口腔材料特性在线测量、口腔激光组织消融监测等方面的应用,展望了该技术在口腔领域的

进一步发展方向。除此之外,FBG 传感技术因其体积小、灵活性好和适于狭小空间可共形布置等特点,为无创植入式的测量提供了新的解决方法,可以作为传统医疗研究和检测手段的替代方法,近年来逐渐被医生和学者们关注。

2.2 FBG 在健康监测领域的应用

脉搏、呼吸、血压和温度是人体四大生命体征,它们对维持人体正常生命活动和表征人体健康异常具有重要作用。为了实时监测一种或多种生命体征,往往需要采用多传感器,同时监测方案必须安全、便捷且低功耗。目前,主流的生命体征监测方式有光学测量、生物电势测量、阻抗测量和使用 MEMS 传感器测量等^[65]。随着对 FBG 传感技术研究的不断深入,利用温度和应变对光纤光栅的 λ 和 n_{eff} 的影响设计用于监测温度和应变以及与其它相关的其他物理参数(如压力、振动和流量等)的传感器正逐渐成为热门研究方向。

Webb 等^[66]提出了一种测量方法,由 5 个 FBG 的系统组成,使用它们在对活兔的肾脏和肝脏进行热疗期间进行温度测量。在随后的研究中^[67],同一作者使用 12 个小尺寸 FBG(1 mm 长)测量组织温度以提高空间分辨率,同时研究还对 FBG 的 MRI 兼容性进行了实验评估,得出了 FBG 对 MRI 具有良好的兼容性。FBG 在 MRI 中的第 2 个应用领域是监测应变和所有相关参数。在过去的几十年中,一些研究集中在通过 FBG 传感器来监测人体通气运动和呼吸频率^[68]。Witt 等^[69]提出了一种用于监测呼吸运动的系统,该系统配备了不同的光纤传感器和一个基于 FBG 的传感器来测量胸围变化。出于类似的目的,Dangelo 等^[70]设计了一种兼容 MR 的传感器用于记录 MRI 检查期间麻醉患者的胸部和腹部运动。特别采用嵌入弹性绷带中的基于 FBG 的传感器来测量胸部运动,该传感器原型对应变具有 1.21 pm/ μe 的高灵敏度。

Chino 等^[71]还针对血压测定一般使用袖带压而无法连续测定的问题,提出使用 FBG 传感器连续无创地测量脉搏和血压等生命体征的方法,实验还研究了脉搏波信号随 FBG 传感器安装方法的变化。结果表明,通过使用夹子将 FBG 传感器压在皮肤上,脉搏波信号的 S/N 比提高了大约 9 倍。日本的 Haseda 等^[72]也开展了类似的研究,进一步证明了 FBG 传感器系统可以同时连续地测量脉搏、呼吸和血压。

基于以上研究以及 FBG 固有的多路复用的特点,不少研究者开始着力开发基于 FBG 的柔性传感器与集成研究^[73]。针对传统传感器在对人体的呼吸、心脏跳动和血压等进行准确、无创和长期检测中无法满足要求的问题,Wang 等^[74]研发了一种基于光纤马赫-曾德干涉仪(OF-MZI)的专为无创和连续监测人体生

命体征而设计的智能床垫,将传感纤维布置在 2 个具有夹层结构的弹性覆盖层之间,使床垫对呼吸和心跳引起的微压十分敏感。研究者们采用行为判断、波形恢复和指标提取等特征提取算法提取生命体征。例如研究中提出可利用高通滤波器去除原始相位信号中的直流分量,得到心跳和呼吸的混合信号,如图 4 所示^[74]。进一步,通过多项式曲线拟合将呼吸波形从混合信号中分离出来,再将混合信号与低频呼吸包络进行减法运算,提取重复频率较高的心跳波形等。临床实验的结果表明,该床垫可根据活动状态的频率能量范围差异区分不同的活动状态,例如区分无身体、上床、身体运动和下床共 4 种活动状态。而且该床垫还有助于临床诊断心动过缓、心动过速、多呼吸和呼吸暂停等异常生理活动。该项研究为使用光纤进行多生命体征监测提供了研究方法和理论依据,表明了光纤传感技术在心脏和呼吸系统疾病的早期发现和预防方面具有广阔的应用前景。

2017 年,Lo 等^[75]设计了装备有 12 个光纤光栅传感器(正面和背面各 6 个)的可穿戴智能服饰,用于监测呼吸速率,通过捕捉光纤光栅的变化数据来定位呼吸时胸壁产生的位移,所测得的呼吸频率与实际呼吸频率一致,证明了该智能服饰用于呼吸频率监测

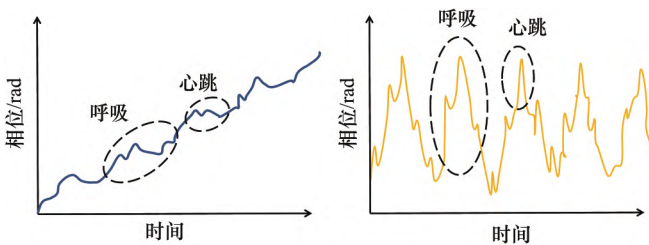


图 4 基于 FBG 的无创连续人体生命体征监测智能床垫心跳和呼吸混合信号^[74]

的可行性,同时为 FBG 在穿戴式服饰上的安装与分布提供了可靠参考。

Nedoma 等^[76]则对 FBG 检测系统进行了临床前试验研究,首次证明了 FBG 系统在 3T(特斯拉)的心脏触发心血管磁共振设备中的适用性。此研究将基于 FBG 的新型系统和临床使用的基于心电图和脉搏血氧饱和度的触发系统进行了比较,证实了光学传感器在心脏触发领域的适用性。

2.3 小结

综上所述,FBG 传感技术的诸多优点使其在医疗领域有着广泛的应用,但在自由度、测量方式和温度补偿等方面仍存在不足,表 3 为部分 FBG 在医疗领域的典型应用。

表 3 部分 FBG 在医疗领域的典型应用

研究者	传感器尺寸	自由度	性能参数	测量方式	是否有温度补偿	应用领域
Shi 等 ^[4]	传感器的近端主体设计长度为 35mm、外径为 20mm	1-DOF	在 0~6N 范围内具有 1.5mN 的高分辨率和良好的线性度,线性度误差为 0.5%	间接测量	无	用于测量针穿刺过程中的插入力
Zhang 等 ^[63]	传感器最大外径为 1.1mm,长度不超过 15mm	3-DOF	横向力和轴向力分辨率分别为 0.124mN 和 0.74mN,量程为 0~7.5mN	间接测量	有	视网膜显微手术
Sun 等 ^[40]	传感器长 20mm、宽 6.25mm、厚 5mm	1-DOF	在 0~10N 测量范围内具有 17.8mN 的分辨率	直接测量	无	腹腔镜手术夹钳
Zarrin 等 ^[24]	传感器呈梯形,上底 3mm、下底 5mm、高 18mm、厚度 2.5mm	2-DOF	在 2~5N 的轴向力和高达 10N 的抓取力下,分辨率为 0.2N	直接测量	无	手术抓取器
Li 等 ^[47]	传感器结构呈圆柱体,直径为 9mm、高度为 20mm	1-DOF	原型传感器可以实现高达 0.93mN 的高分辨率,并且能够在 0~5N 的力测量范围内工作	直接测量	无	微创手术中组织定位与触诊
Li 等 ^[52]	外径为 9mm,长度为 19mm	3-DOF	0~2N 范围内的轴向力检测具有 8.8mN 的高分辨率。双轴扭矩为 $\pm 5.6\text{N}\cdot\text{mm}$ 时,分辨率分别为 $20.2\text{N}\cdot\text{mm}$ 和 $22.1\text{N}\cdot\text{mm}$	直接测量	有	微创手术组织触诊
Iele 等 ^[48]	传感器探头直径为 0.9mm,探头总长约 80mm	1-DOF	灵敏度约为 1nm/N,量程未知	间接测量	—	前列腺癌筛查
甘露等 ^[55]	传感器外观呈圆柱形,采用螺旋弹性体结构,尺寸未知	1-DOF	受力范围为 0~1N,灵敏度为 642.56 $\mu\text{m}/\text{N}$	间接测量	—	微创手术组织触诊

从表 3 可以看出,基于 FBG 的医用传感器在尺寸和性能方面都有着出色的表现,特别是在一定程度上解决了传感器尺寸小型化和提高传感器性能之间的矛盾。但从其长远发展来看,其仍存以下几点局限。

① 由于 FBG 的交叉敏感特性,温度和应力变化都会使光纤光栅的反射光中心波长值发生变化。有研

究表明,常用光纤光栅的有效光弹性系数 P_e 在室温下近似为 0.22^[27],温度灵敏度系数 α 与 ξ 之和约为 5^[77]。因此温度引起的光纤光栅波长变化不容忽视。但文献调研发现,大多数的研究都没有在应力检测时对温度进行补偿,因此计算值与真实值之间存在较大误差。

② 在测力自由度方面,与传统电学传感器的多自由度测力性能相比^[11,78-80],采用 FBG 技术的测力装置还局限在低维方面。这是因为从制造的角度来看,FBG 式传感器与电阻式传感器具有相似的缺点。一方面,FBG 的光栅长度在一定程度上限制了传感器的小型化。虽然 FBG 的尺寸相比于电学元件要小很多,但也不能做得无限小,实验室常见的光纤光栅栅区长度约为 5 mm,这是直接限制传感器尺寸进一步小型化的重要因素之一。另一方面,由于 FBG 容易发生弯曲变形,一般需要安装并固定在弹性结构体上,而弹性结构体和敏感元件是多轴力传感器的 2 个关键部件,它们决定着传感器的性能^[81]。常见的弹性结构体和敏感元件组成复杂,组内耦合度高,维间耦合极大地限制了多维/力矩传感器的精度^[82]。受制作工艺等限制,传感器的尺寸难以小型化,设计中通常使用结构优化来提升灵敏度,但该过程往往以牺牲尺寸为代价。除此之外,FBG 与弹性结构的结合需要高度精细的手工操作,其粘贴长度、粘贴方式和胶粘剂的选择都会对其对应变传递产生影响^[83-88],因此其质量控制很困难。

③ 由于 FBG 医用传感器存在尺寸小型化的问题,现有的基于 FBG 测力技术多采用间接测量,即将弹性体设置在直接接触面的远端,这种方式可以在确保力反馈的前提下尽可能减小装置尺寸。但该方法所测量的力经杠杆作用和摩擦等因素的共同影响与真实值存在偏差。有研究表明,由于手术器械与人体组织间存在摩擦等作用,这种相互作用力在杠杆效应下会被放大甚至扭曲,从而导致医生的手指所感受到的握力值通常是器械远端所施加的实际夹紧力的 2~6 倍^[89]。此外,现有的研究表明,性能较好的力觉传感依赖于研发者自主设计装置器械,但这些器械距离商用仍有较大差距,而且脱离了医疗器械的规范标准,其与现有医疗装置的集成也十分困难。

④ 虽然现有的触觉传感器在尺寸小型化方面取得了较大突破,但与人的触觉相比,仍缺少对位置的感知,而这也是人类感知中的重要组成部分。组织在夹钳的位置在一定程度上决定了医生要施加多大的力,由于夹钳存在杠杆效应,加持组织距离夹钳销轴的远近不同,所受的力也不同,而返回的力值往往是整个夹面的平均值,这就可能会导致离销轴近的组织受力过载而发生损伤。另外,考虑到人体组织的形状特点,一般边缘位置较薄而中间厚(如肝叶),在加载力相同的情况下,边缘部分更容易损伤。但现有力传感技术大多只能用于检测是否加持到组织以及测量夹持力的大小,无法实现如人一般根据受力推算出夹持位置信息,要想实现力位同步检测有赖于多点分布式 FBG 传感

技术的发展。

⑤ 在柔性传感方面,FBG 传感技术虽展现出优良的传感性能,但其局限也较为明显。首先,光纤光栅自身脆弱易断的特性限制了柔性穿戴装置的活动幅度。为了更好地保护它们,一般采用隔层等对其进行特殊保护^[73-74],这在一定程度上限制了传感的灵敏度。此外,光纤解调仪的尺寸、信号传输和供电等问题也使得基于 FBG 的柔性穿戴设备结构复杂,这些与 FBG 的信号解耦、成本等共同限制了其发展。

3 FBG 在健康医疗领域的应用前景与展望

① 医用力触觉传感器开发。由于 FBG 传感技术具有抗电磁干扰能力强、生物相容性高、带宽宽和尺寸小等特点,相比于传统电学传感元件更适合用于医疗领域。例如,冠状动脉狭窄治疗的金标准是在实时 X 射线成像下进行的经皮心脏介入治疗,但大量临床证据表明^[44],在 X 射线照射下进行手术,外科医生和工作人员容易出现严重的健康问题。使用主从结构的远程机器人血管介入系统减少了 X 射线照射,提高了临床效果,但在手术过程中失去触觉反馈,这极大地限制了此类系统的推广应用。而手术过程中的电磁干扰和人体电解环境都可能对传统电学传感元件工作产生不利影响,降低测量的准确性。为了缓解干扰问题,研究人员提出了用于血管内力测量的光纤传感器。此外,光纤对电磁场的免疫力,以及对 MRI 中使用的电磁场的干扰可以忽略不计,使得该技术对于开发“MR 兼容”的力触觉传感器也非常有吸引力。虽然 FBG 本身尺寸较小,但目前基于 FBG 传感技术的力触觉传感器受到弹性体结构限制,其在多维力检测方面仍存在较大局限,这依赖于材料力学和结构力学的进步。

② 高精度与分布式检测系统。FBG 技术允许开发具有良好计量特性的传感器,例如精度高、带宽大、动态范围大、应变和热灵敏度高(典型值范围从 0.64~1.2 pm/ $\mu\epsilon$,以及从 6.8~13 pm/ $^{\circ}\text{C}$)^[45]。此外,由于可以在单根光纤上写入具有不同 Bragg 波长的多个光栅,因此该技术还具有多路复用的优点,可实现多点实时分布式测量。例如,传统温度和血压测量方式往往是单点测量,无法全面及时反映其在空间上的分布以及随时间的变化,分布式光纤传感系统能够很好地解决这一难题。由于光纤直径极小,有助于减小分布式传感系统的整体尺寸,同时分布式光纤传感系统能够排除偶然性干扰,提高对微小变化的感知灵敏度。有研究表明,分布式光纤温度传感系统的测量精度可达 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。

③ 柔性穿戴设备研发。随着新型柔性材料技术

和光纤传感技术的发展,激发了生物医学和医疗辅助机器人等热点领域对柔性传感器的研究热情。光纤由于其尺寸小、柔韧性好、集成度高和能够分布式测量等优点,非常适用于柔性穿戴设备研发。有分析表明,使用硅橡胶、纺织品以及其他聚合物作为柔性材料基底可制作成高密度分布式柔性感知传感器^[73]。此举将可穿戴智能服饰柔软轻便的特点与分布式光纤传感系统的优点结合起来,可用于生物医学和实时人体生命体征监测。电类柔性传感器元件的弹性模量较大且易受电磁干扰,在潮湿、易燃、易爆等恶劣的工作环境中应用受到限制,而基于 FBG 的柔性穿戴装置及其衍生品是良好的替代品。

④ 人工智能算法融合与力/位检测。分布式光纤传感系统与单个 FBG 相比,其信号处理算法更复杂。因此,随着深度学习以及人工智能研究的兴起,利用机器学习进行高斯过程回归预测处理 FBG 的温度传感信号^[90]、使用机器学习算法快速准确地测量和重建柔性基底材料表面形状^[91],这为解决光纤传感器的信号处理难题提供了新思路。此外,为了使医疗器械力触觉反馈更加接近人的感知方式,可以采用神经网络来解算分布式 FBGs 触觉传感器信号中包含的力和位置信息^[92],从而为机器学习和软触觉传感器设计之间的交叉融合做出积极贡献。这些都将是未来人工智能算法与 FBG 传感器融合发展的新方向。

4 结束语

本文对近几年来 FBG 在健康医疗领域的研究成果进行了介绍,并对 FBG 在健康医疗领域的应用前景进行了科学预测,实验研究和临床研究证实了光纤光栅具有解决健康医疗领域相关问题的能力,同时具有良好的应用前景。但仍需认识到,FBG 传感器应用于健康医疗领域的研究涉及到材料、结构、光学、信息处理和生物化学等诸多学科,目前的研究工作还处于初级阶段,距离实际应用还存在一定差距,这主要表现在光纤光栅交叉敏感问题、光栅栅区细分问题、弹性结构尺寸局限以及光纤任意弯曲受限、光源与解调模块微型化难度高等方面。近年来,国内外研究人员对医用光纤光栅传感器的研究表现出了浓厚的兴趣,尤其在学科交叉融合的推动下,力(位)触觉传感器开发和健康体征监测系统热点领域的研究和应用前景更为广阔,因此对基于 FBG 传感器的健康医疗领域进行深入研究具有重要意义。

参考文献:

[1] PUANGMALI P, ALTHOEFFER K, SENEVIRATNE L D, et al. State-of-the-art in force and tactile sensing for minimally invasive surgery [J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8(4):

371 – 381.

- [2] TANG B, HANNA G B, CUSCHIERI A. Analysis of errors enacted by surgical trainees during skills training courses [J]. Surgery, 2005, 138(1): 14 – 20.
- [3] KIM U, KIM Y B, SEOK D Y, et al. A surgical palpation probe with 6-axis force/torque sensing capability for minimally invasive surgery [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(3): 2755 – 2765.
- [4] SHI C Y, TANG Z X, WANG S X. Design and experimental validation of a fiber Bragg grating-enabled force sensor with an ortho-planar spring-based flexure for surgical needle insertion [J]. IEEE Transactions on Medical Robotics and Biomechanics, 2021, 3(2): 362 – 371.
- [5] TANG Z X, WANG S X, SHI C Y. Development of a hybrid force-displacement sensor based on fiber Bragg grating for radial artery pulse waveform measurement [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(18): 20045 – 20054.
- [6] 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 (in Chinese).
- [7] HONG M B, JO Y H. Design and evaluation of 2-DOF compliant forceps with force-sensing capability for minimally invasive robot surgery [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2012, 28(4): 932 – 941.
- [8] HAN K, CHEN L H, XIA M Y, et al. Design and optimization of a high sensitivity joint torque sensor for robot fingers [J]. Measurement, 2020, 152: 107328.
- [9] LI K, PAN B, ZHAN J C, et al. Design and performance evaluation of a 3-axis force sensor for MIS palpation [J]. Sensor Review, 2015, 35(2): 219 – 228.
- [10] PÉREZ UBEDA R, GUTIÉRREZ RUBERT S C, ZOTOVIC STANISIC R, et al. Design and manufacturing of an ultra-low-cost custom torque sensor for robotics [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2018, 18(6): 1786.
- [11] KIM U, LEE D H, MOON H, et al. Design and realization of grasper-integrated force sensor for minimally invasive robotic surgery [C]//2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014: 4321 – 4326.
- [12] LEE C, KIM U, LEE D H, et al. Development of a smart handheld surgical tool with tactile feedback [J]. Intelligent Service Robotics, 2017, 10(2): 149 – 158.
- [13] 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, 2016: 3684 – 3689.
- [14] KIM U, LEE D H, YOON W J, et al. Force sensor integrated

- surgical forceps for minimally invasive robotic surgery [J]. IEEE Transactions on Robotics 2015 31(5): 1214 – 1224.
- [15] QASAMEH M A ,SOKHANVAR S ,DARGAHI J ,et al. PVDF-based microfabricated tactile sensor for minimally invasive surgery [J]. Journal of Microelectromechanical Systems 2009 18(1): 195 – 207.
- [16] CHUANG C H ,LI T H ,CHOU I C ,et al. Piezoelectric tactile sensor for submucosal tumor detection in endoscopy [J]. Sensors and Actuators A: Physical 2016 244: 299 – 309.
- [17] SHARMA S ,AGUILERA R ,RAO J Y ,et al. Piezoelectric needle sensor reveals mechanical heterogeneity in human thyroid tissue lesions [J]. Scientific Reports 2019 9(1): 9282.
- [18] KALANTARI M ,RAMEZANIFARD M ,AHMADI R ,et al. Design ,fabrication ,and testing of a piezoresistive hardness sensor in Minimally Invasive Surgery [C]//2010 IEEE Haptics Symposium. 2010: 431 – 437.
- [19] 申景金. 面向二尖瓣微创手术的心脏接触力学研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学 2013.
- SHEN J J. Research on heart contact meachics in the minimally invasive surgery for mitral valve [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics 2013 (in Chinese) .
- [20] XU T Z ,WANG H Y ,XIA Y ,et al. Piezoresistive pressure sensor with high sensitivity for medical application using peninsula-island structure [J]. Frontiers of Mechanical Engineering 2017 12(4): 546 – 553.
- [21] LIOU J C ,FANG K W. Non-invasive psychological signal measurement with photoelectric sensor [C]//2017 6th International Symposium on Next Generation Electronics. 2017: 1 – 2.
- [22] LU Q R ,XIN H Y ,HUANG H ,et al. Pulse detection system based on photoelectric volumetric sensor [C]//Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Materials Science ,Machinery and Energy Engineering. 2017: 1594 – 1597.
- [23] JU L ,MENG Q B. Terminal design of nontouch queryable photoelectric pulse oximetry [C]//Proceedings of the 2015 International Symposium on Computers & Informatics. 2015: 1663 – 1670.
- [24] ZARRIN P S ,ESCOTO A ,XU R ,et al. Development of a 2-DOF sensorized surgical grasper for grasping and axial force measurements [J]. IEEE Sensors Journal 2018 18(7): 2816 – 2826.
- [25] BANDARI N ,ORSINI P ,CORBEIL J S ,et al. Optomechanical modeling and validation of a distributed Bragg reflector force sensor with drift and temperature compensation [J]. IEEE Sensors Journal 2021 21(3): 2929 – 2941.
- [26] 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.
- [27] LONG J Y ,LIANG Q K ,SUN W ,et al. Ultrathin three-axis FBG wrist force sensor for collaborative robots [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 2021 70: 1 – 15.
- [28] 景燕敏. 光纤光栅传感特性的分析与科学计算 [D]. 昆明: 昆明理工大学 2013.
- JIN Y M. Analysis and scientific calculation of fiber Bragg grating sensing characteristics [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology 2013 (in Chinese) .
- [29] 陈宝杰. 高温光纤布拉格光栅振动传感器设计与研究 [D]. 太原: 中北大学 2020.
- CHEN B J. Design and research fiber Bragg grating vibration sensor for high-temperature [D]. Taiyuan: North University of China 2020 (in Chinese) .
- [30] 李宁. 光纤 Bragg 光栅温度/应变解调仪设计 [D]. 太原: 太原理工大学 2019.
- LI N. Fiber Bragg grating temperature/strain demodulator design [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology 2019 (in Chinese) .
- [31] 王飞文,冯艳,张华,等. 光纤 Bragg 光栅触觉传感器研究进展 [J]. 传感器与微系统 2018 37(9): 1 – 4.
- WANG F W ,FENG Y ,ZHANG H ,et al. Research progress of fiber Bragg grating tactile sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies 2018 37(9): 1 – 4 (in Chinese) .
- [32] 唐利. 基于光纤光栅温湿度同时测量技术的研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学 2017.
- TANG L. Study on the simultaneous measuerement of temperature and humifity based on fiber grating [D]. Qinhuangdao: Yanshan University 2017 (in Chinese) .
- [33] 耿胜各. 光纤光栅温度传感器中应变与温度交叉敏感问题研究 [D]. 南京: 南京邮电大学 2017.
- GENG S G. Research on cross-sensitivity of stress and temperature in fiber Bragg grating temperature sensor [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications 2017 (in Chinese) .
- [34] 谢芳,王慧琴. 用光纤 F-P 滤波器解调的光纤光栅传感器的研究 [J]. 光电子·激光 2003 14(4): 359 – 362.
- XIE F ,WANG H Q. A fiber Bragg grating sensing system with a fiber F-P wavelength filter [J]. Journal of Optoelectronicslaser 2003 14(4): 359 – 362 (in Chinese) .
- [35] IORDACHITA I ,SUN Z L ,BALICKI M ,et al. A sub-millimetric 0.25 mN resolution fully integrated fiber-optic force-sensing tool for retinal microsurgery [J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery 2009 4(4): 383 – 390.
- [36] 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 2019 8: 7682 – 7708.
- [37] SOKHANVAR S ,PACKIRISAMY M ,DARGAHI J. MEMS

- endoscopic tactile sensor: toward in situ and in-vivo tissue softness characterization [J]. *IEEE Sensors Journal* ,2009 , 9(12) : 1679 – 1687.
- [38] LAI W J ,CAO L ,TAN R X ,et al. An integrated sensor-model approach for haptic feedback of flexible endoscopic robots [J]. *Annals of Biomedical Engineering* , 2020 , 48(1) : 342 – 356.
- [39] KENNGOTT H G ,MÜLLER-STICH B P ,REITER M A ,et al. Robotic suturing: technique and benefit in advanced laparoscopic surgery [J]. *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies* 2008 ,17(3) : 160 – 167.
- [40] SUN K ,LI M ,WANG S 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.
- [41] WANG P P ,ZHANG S Q ,LIU Z Y ,et al. Smart laparoscopic grasper integrated with fiber Bragg grating based tactile sensor for real-time force feedback [J]. *Journal of Biophotonics* 2022: e202100331.
- [42] 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.
- [43] SONG H ,KIM K ,LEE J. Development of optical fiber Bragg grating force-reflection sensor system of medical application for safe minimally invasive robotic surgery [J]. *The Review of Scientific Instruments* 2011 82(7) : 074301.
- [44] HOOSHIAR A ,NAJARIAN S ,DARGAHI J. Haptic telero-robotic cardiovascular intervention: a review of approaches , methods and future perspectives [J]. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering* 2020 ,13: 32 – 50.
- [45] TAFFONI F ,FORMICA D ,SACCOMANDI P ,et al. Optical fiber-based MR-compatible sensors for medical applications: an overview [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)* 2013 , 13(10) : 1410
- [46] NICHOLS K A ,OKAMURA A M. Methods to segment hard inclusions in soft tissue during autonomous robotic palpation [J]. *IEEE Transactions on Robotics* ,2015 31(2) : 344 – 354.
- [47] LI T L ,SHI C 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.
- [48] IELE A ,RICCIARDI A ,PECORELLA C ,et al. Miniaturized optical fiber probe for prostate cancer screening [J]. *Bio-medical Optics Express* 2021 ,12(9) : 5691 – 5703.
- [49] TREJOS A L ,JAYENDER J ,PERRI M T ,et al. Robot-assisted tactile sensing for minimally invasive tumor localization [J]. *The International Journal of Robotics Research* , 2009 28(9) : 1118 – 1133.
- [50] CULMER P ,BARRIE J ,HEWSON R ,et al. Reviewing the technological challenges associated with the development of a laparoscopic palpation device [J]. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery* , 2012 8(2) : 146 – 159.
- [51] LIU H B ,LI J C ,SONG X J ,et al. Rolling indentation probe for tissue abnormality identification during minimally invasive surgery [J]. *IEEE Transactions on Robotics* ,2011 , 27(3) : 450 – 460.
- [52] LI T L ,PAN A 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.
- [53] POLYGERINOS P ,ZBYSZEWSKI D ,SCHAEFFTER T ,et al. MRI-compatible fiber-optic force sensors for catheterization procedures [J]. *IEEE Sensors Journal* 2010 ,10(10) : 1598 – 1608.
- [54] LI T L ,KING N K K ,REN H L. Disposable FBG-based tri-directional force/torque sensor for aspiration instruments in neurosurgery [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2020 67(4) : 3236 – 3247.
- [55] 甘露 ,郑甲红. 用于微创手术组织触诊中的 FBG 传感器研发 [J]. *科技与创新* 2021(22) : 30 – 31.
GAN L ,ZHENG J H. Research and development of FBG sensor for tissue palpation in minimally invasive surgery [J]. *Science and Technology & Innovation* ,2021 (22) : 30 – 31(in Chinese) .
- [56] LYU C H ,WANG S X ,SHI C 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.
- [57] CHEN X Y ,YI X H ,QIAN J W ,et al. Updated shape sensing algorithm for space curves with FBG sensors [J]. *Optics and Lasers in Engineering* 2020 ,129: 106057.
- [58] PARK Y L ,ELAYAPERUMAL S ,DANIEL B ,et al. Real-time estimation of 3-D needle shape and deflection for MRI-guided interventions [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 2010 ,15(6) : 906 – 915.
- [59] HENKEN K ,VAN GERWEN D ,DANKELMAN J ,et al. Accuracy of needle position measurements using fiber Bragg gratings [J]. *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies* 2012 21(6) : 408 – 414.
- [60] MOON H ,JEONG J ,KANG S ,et al. Fiber-Bragg-grating-based ultrathin shape sensors displaying single-channel sweeping for minimally invasive surgery [J]. *Optics and Lasers in Engineering* 2014 59: 50 – 55.
- [61] ROESTHUIS R J ,KEMP M ,VAN DEN DOBBELSTEEN J J ,et al. Three-dimensional needle shape reconstruction using an array of fiber Bragg grating sensors [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 2014 ,19(4) : 1115 – 1126.
- [62] SHI C Y ,LUO X B ,QI P ,et al. Shape sensing techniques for continuum robots in minimally invasive surgery: a survey

- [J]. IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering 2017 , 64(8) : 1665 – 1678.
- [63] 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.
- [64] 赵臻. 光纤光栅传感技术在口腔研究领域的应用进展 [J]. 口腔医学研究 2020 ,36(1) : 10 – 12.
ZHAO Z. Application progress of fiber grating sensing technology in oral research [J]. Journal of Oral Science Research 2020 ,36(1) : 10 – 12(in Chinese) .
- [65] CARRIERO C. 生命体征监测技术: 对人体实施状态监控 [J]. 电子产品世界 2020 ,27(11) : 19 – 21.
CARRIERO C. Vital sign Technologies: condition-based monitoring of the human body [J]. Electronic Engineering & Product World 2020 ,27(11) : 19 – 21(in Chinese) .
- [66] WEBB D J ,HATHAWAY M W ,JACKSON D A ,et al. First in-vivo trials of a fiber Bragg grating based temperature profiling system [J]. Journal of Biomedical Optics ,2000 ,5: 45 – 50.
- [67] SCHENA E ,SACCOMANDI P ,GIURAZZA F ,et al. Experimental assessment of CT-based thermometry during laser ablation of porcine pancreas [J]. Physics in Medicine and Biology 2013 ,58(16) : 5705 – 5716.
- [68] WEHRLE G ,NOHAMA P ,KALINOWSKI H J ,et al. A fibre optic Bragg grating strain sensor for monitoring ventilatory movements [J]. Measurement Science and Technology , 2001 ,12(7) : 805 – 809.
- [69] WITT J ,NARBONNEAU F ,SCHUKAR M ,et al. Medical textiles with embedded fiber optic sensors for monitoring of respiratory movement [J]. IEEE Sensors Journal ,2012 , 12(1) : 246 – 254.
- [70] DANGELO L T ,WEBER S ,HONDA Y ,et al. A system for respiratory motion detection using optical fibers embedded into textiles [C]//2008 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 2008: 3694 – 3697.
- [71] CHINO S ,ISHIZAWA H ,KOYAMA S ,et al. Influence of installing method on pulse wave signal in blood pressure prediction by FBG sensor [C]//2018 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications. 2018: 1 – 6.
- [72] HASEDA Y ,BONEFACINO J ,TAM H Y ,et al. Measurement of pulse wave signals and blood pressure by a plastic optical fiber FBG sensor [J]. Sensors (Basel ,Switzerland) , 2019 ,19(23) : 5088.
- [73] 徐小强 ,杜阳 ,冒燕 ,等. 光纤布拉格光栅柔性传感器研究进展 [J]. 应用光学 2021 ,42(5) : 932 – 940.
XU X Q ,DU Y ,MAO Y ,et al. Research progress of flexible sensor of fiber Bragg grating [J]. Journal of Applied Optics , 2021 ,42(5) : 932 – 940(in Chinese) .
- [74] WANG S M ,NI X L ,LI L Y ,et al. Noninvasive monitoring of vital signs based on highly sensitive fiber optic mattress [J]. IEEE Sensors Journal 2020 ,20(11) : 6182 – 6190.
- [75] LO PRESTI D ,MASSARONI C ,SACCOMANDI P ,et al. A wearable textile for respiratory monitoring: feasibility assessment and analysis of sensors position on system response [C]//2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 2017: 4423 – 4426.
- [76] NEDOMA J ,MARTINEK R ,FAJKUS M ,et al. A novel FBG-based triggering system for cardiac MR imaging at 3 Tesla: a pilot pre-clinical study [J]. IEEE Access 2020 ,8: 181205 – 181223.
- [77] 钱文文 ,余晓芬 ,夏忠诚 ,等. 光纤光栅传感技术在医疗设备领域的应用 [J]. 中国医学装备 ,2019 ,16(10) : 153 – 156.
QIAN W W ,YU X F ,XIA Z C ,et al. Applications of fiber grating sensor technique in medical equipment field [J]. China Medical Equipment ,2019 ,16(10) : 153 – 156(in Chinese) .
- [78] LEE D H ,KIM U ,GULREZ T ,et al. A laparoscopic grasping tool with force sensing capability [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 2016 ,21(1) : 130 – 141.
- [79] LEE D H ,KIM U ,JUNG H ,et al. A capacitive-type novel six-axis force/torque sensor for robotic applications [J]. IEEE Sensors Journal 2016 ,16(8) : 2290 – 2299.
- [80] KIM U ,KIM Y B ,SO J ,et al. Sensorized surgical forceps for robotic-assisted minimally invasive surgery [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics ,2018 ,65(12) : 9604 – 9613.
- [81] GUO Y X ,KONG J Y ,LIU H H ,et al. A three-axis force fingertip sensor based on fiber Bragg grating [J]. Sensors and Actuators A: Physical 2016 ,249: 141 – 148.
- [82] 梁桥康. 特殊应用的多维力/力矩传感器研究与应用 [D]. 合肥: 中国科学技术大学 2010.
LIANG Q K. Research on multi-dimensional F/T sensor for specific applications [D]. Hefei: University of Science and Technology of China 2010(in Chinese) .
- [83] 赵鹏冲 ,段建立 ,孙阳阳 ,等. 光栅粘贴长度对应变传递影响的实验研究 [J]. 压电与声光 2016 ,38(2) : 250 – 252.
ZHAO P C ,DUAN J L ,SUN Y Y ,et al. The experimental study on the influence of bonding length on FBG strain transfer [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics 2016 ,38(2) : 250 – 252(in Chinese) .
- [84] 王源 ,章征林 ,孙阳阳 ,等. 不同表面粘贴方式对光纤光栅应变传递的影响 [J]. 压电与声光 2016 ,38(1) : 106 – 110.
WANG Y ,ZHANG Z L ,SUN Y Y ,et al. The influence of different surface paste on FBG strain transfer [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics 2016 ,38(1) : 106 – 110(in Chinese) .

- [85] 李煦, 贾丽杰, 李嘉. 粘贴式光纤光栅传感器胶粘剂的选择[C]//第十四届中国科协年会第 11 分会场: 低成本、高性能复合材料发展论坛论文集. 2012: 112 – 117.
LI X, JIA L J, LI J. Selection of adhesive for bonded fiber Bragg grating sensor [C]//The 11th Session of the 14th Annual Conference of China Association for Science and Technology: Proceedings of the Forum on the Development of Low Cost and High Performance Composites. 2012: 112 – 117(in Chinese) .
- [86] 权志桥, 方新秋, 薛广哲, 等. 表面粘贴布拉格光纤光栅传感器的应变传递耦合机理研究[J]. 中国激光, 2020, 47(1) : 0104004.
QUAN Z Q, FANG X Q, XUE G Z, et al. Strain transfer coupling mechanism of surface-bonded fiber Bragg grating sensor [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1) : 0104004(in Chinese) .
- [87] 苏晨辉, 张雷, 隋青美, 等. 表面粘贴式光纤光栅传感器的应变传递机理分析与实验研究[J]. 传感技术学报, 2018, 31(4) : 513 – 517.
SU C H, ZHANG L, SUI Q M, et al. Strain transfer mechanism analysis and experimental study of surface bonded fiber Bragg grating sensor [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(4) : 513 – 517(in Chinese) .
- [88] 季冬亮. 粘贴式光纤光栅传感器动态应变传递规律研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
JI D L. Study on the dynamic strain transfer law of surface bonded fiber Bragg grating sensor [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017(in Chinese) .
- [89] TREJOS A L, PATEL R V, NAISH M D. Force sensing and its application in minimally invasive surgery and therapy: a survey [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2010, 224(7) : 1435 – 1454.
- [90] DJURHUUS M S E, WERZINGER S, SCHMAUSS B, et al. Machine learning assisted fiber Bragg grating-based temperature sensing [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(12) : 939 – 942.
- [91] LUN T L T, WANG K, HO J D L, et al. Real-time surface shape sensing for soft and flexible structures using fiber Bragg gratings [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(2) : 1454 – 1461.
- [92] MASSARI L, SCHENA E, MASSARONI C, et al. A machine-learning-based approach to solve both contact location and force in soft material tactile sensors [J]. Soft Robotics, 2020, 7(4) : 409 – 420.

□

(上接第 8 页)

- [29] 石中盘, 赵铁石, 厉敏, 等. 大量程柔性铰六维力传感器静态解耦的研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(5) : 1062 – 1069.
SHI Z P, ZHAO T S, LI M, et al. Research on static decoupling of large range flexible joint six-axis force sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(5) : 1062 – 1069(in Chinese) .
- [30] BENFIELD D C. A study of six-axis MEMS sensors for load detection in biomedical applications [D]. Edmonton: University of Alberta, 2012.
- [31] SUN Y, KIM K. MEMS-based micro and nano grippers with two-axis force sensors: US20130037512 [P]. 2013-02-14.
- [32] BROOKHUIS R A, DROOGENDIJK H, DE BOER M J, et al. Six-axis force-torque sensor with a large range for biomechanical applications [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2014, 24(3) : 035015.
- [33] LIANG Q K. Development of a touch probe based on five-dimensional force/torque transducer for coordinate measuring machine (CMM) [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2012, 28(2) : 238 – 244.
- [34] 高理富, 王定成, 唐毅, 等. 一种具有力觉触觉临场感的主从机器人装配作业平台[J]. 机器人, 2002, 24(1) : 81 – 85.
GAO L F, WANG D C, TANG Y, et al. A master-slave robot system with force and touch telepresence [J]. Robot, 2002, 24(1) : 81 – 85(in Chinese) .
- [35] HE X C, HANDA J, GEHLBACH P, et al. A submillimetric 3-DOF force sensing instrument with integrated fiber Bragg grating for retinal microsurgery [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2014, 61(2) : 522 – 534.
- [36] 郑成闻, 宋全军, 佟丽娜, 等. 一种柔性双足压力检测装置与步态分析系统设计研究[J]. 传感技术学报, 2010, 23(12) : 1704 – 1708.
ZHENG C W, SONG Q J, TONG L N, et al. Research on the design of a flexible biped plantar pressure measurement device and gait analysis system [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(12) : 1704 – 1708(in Chinese) .
- [37] 葛运建, 张建军, 戈瑜, 等. 无所不在的传感与机器人感知[J]. 自动化学报, 2002, 28(S1) : 125 – 133.
GE Y J, ZHANG J J, GE Y, et al. Ubiquitous sensing and robot perception [J]. Acta Automatica Sinica, 2002, 28(S1) : 125 – 133(in Chinese) .
- [38] 胡重阳, 梅涛, 刘彦伟, 等. 仿生六足机器人机构设计及控制方法研究[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(11) : 1621 – 1626.
HU C Y, MEI T, LIU Y W, et al. Research of control method and mechanism design of bio-inspired hexapod robot [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33(11) : 1621 – 1626(in Chinese) .

□