

基于光纤 Bragg 光栅的机器人力/力矩触觉传感技术研究进展

郭永兴¹ 孔建益¹ 熊禾根¹ 李公法¹ 刘洪海^{1, 2}

¹ 武汉科技大学机械自动化学院, 湖北 武汉 430081

² 朴茨茅斯大学智能系统与生物医学机器人实验室, 英国朴茨茅斯 PO1 3HE

摘要 力觉传感器是机器人最重要的外部传感器之一。随着特种机器人的兴起, 研发能适应特殊环境(如微创手术、核磁共振手术、救灾救援、核电站、消防等)的新型力传感器显得尤为重要。光纤 Bragg 光栅(FBG)是一种新型无源光器件, 以光为传感信号, 具有无电检测、不受电磁干扰、无零漂、精度高、耐高温、单根光纤可串接多个光栅等优势。自 2001 年国外学者首次将 FBG 用于机器人多维力传感技术后, 基于 FBG 的力/力矩触觉传感技术逐渐得到广泛研究和应用。基于此, 综述了目前国内外基于光纤 Bragg 光栅原理的多维力/力矩传感技术、力触觉传感技术设计及应用的研究现状, 展望了其发展趋势。

关键词 光纤光学; 光纤 Bragg 光栅; 多维力/力矩传感; 触觉传感; 机器人

中图分类号 TP212; TP242 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP201653.050006

Advances in Robot Force/Torque Tactile Sensing Technology Based on Fiber Bragg Grating

Guo Yongxing¹ Kong Jianyi¹ Xiong Hegen¹ Li Gongfa¹ Liu Honghai^{1, 2}

¹ School of Machinery and Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China

² Intelligent Systems and Biomedical Robotics Group, University of Portsmouth, Portsmouth, PO1 3HE, UK

Abstract Force and torque sensor is one of the most important external sensors for robots. With the development of special robots, it is becoming more and more important to research and develop a new type of force sensors that could be applied to special environment, such as minimally invasive surgery, nuclear magnetic resonance surgery, rescue and relief, nuclear power station, fire fighting, etc. As a special type of optical passive component, the fiber Bragg grating (FBG), taking light as sensing signal, is of prominent advantages, such as non-electric detection, immunity to electromagnetic noise, no zero drift, high precision, high temperature resistance, and the fact that multiple FBGs can be arrayed along a single fiber. Since FBGs was first used in robot multi-component force sensors in 2001, FBG based force/torque tactile sensing technology has been researched and applied widely. We describes the state of the art in multi-component force/torque sensing and tactile sensing technologies based on FBG, and presents the future work.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; multi-dimensional force/torque sensing; tactile sensing; robots

OCIS codes 060.3735; 060.2370

1 引言

多维力/力矩传感器、力触觉传感器能将机器人所处的环境作用力信息实时感知并反馈给控制系统或操控人员, 是柔顺控制、力/位置控制、远程控制等技术的基础, 对机器人的精准操控极为重要^[1-2]。当前, 特种机器人的发展逐步兴起, 如微创手术机器人、核电站救灾机器人、地震救援机器人、消防机器人等^[3-6], 它们或

收稿日期: 2015-11-13; 收到修改稿日期: 2015-12-21; 网络出版日期: 2016-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(51575407, 51509194)、中国博士后科学基金(2015M572208)

作者简介: 郭永兴(1986—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: yongxing_guo@wust.edu.cn

工作于核辐射、强电磁干扰、高温环境,或需进入人体、人体组织等特殊环境,这对机器人搭载的力传感器在特殊环境下的适用性、适应性提出了新的、更高的要求。

现有的力传感器大都基于电阻应变计、压电等传统的敏感元件设计而成,这些敏感元件以弱电为传感信号,存在着信号易受电磁干扰、温度零漂、无法正常工作于大范围温度波动的环境、体积较大、难以与诸如微创手术机器人微小的手术臂融合等实际问题^[7]。光纤光栅是利用光纤的光敏特性在细微的光纤纤芯上建立周期性折射率分布,从而控制光在该区域的传播方式,是一种新型无源光器件。光纤光栅以光为传感信号,具备无电检测、不受电磁干扰、可耐高温、无零漂、精度高、体积微小、一根光纤可串接多个光栅等优势。自20世纪90年代起,光纤光栅传感技术逐步为世人所熟知,并迅速成为国内外的研究热点。

目前,光纤光栅传感技术在土木工程、机械装备、航空航天等传统领域,及高新尖领域的结构健康监测(SHM)中发挥着重要作用,有关其传感方法^[8]、设计制造封装工艺^[9]、信息处理^[10]等是当前研究热点。近几年来,光纤光栅传感技术在机器人传感领域崭露头角,其独特的技术优势,尤其是光信号良好的抗干扰能力、极微小的体积等,成为特种机器人感知技术领域的研究热点。当前,这些应用研究报道主要集中于力/力矩触觉传感,新的传感方法、传感弹性体构型等被不断提出,并迅速应用在机器人手臂、微创机器人手术器械、核磁共振检查探针等装置中,发展迅猛^[11-12]。因此,非常有必要对这种新型机器人力传感技术进行总结与归纳,呈现其技术研究现状与研究热点。

本文在简要介绍光纤 Bragg 光栅的发现、发展和其基本传感原理的基础上,重点总结了国内外基于光纤 Bragg 光栅的多维力/力矩传感技术、力触觉技术的研究发展现状,并对研究重点和发展趋势进行展望。

2 光纤 Bragg 光栅及其传感原理简介

1978年,加拿大渥太华通信研究中心的 Hill 等^[13-14]将波长为 488 nm 的氩离子激光注入到光纤的纤芯时,两束强激光互相干涉,形成了周期分布的驻波图形,进而在光纤中诱发出周期性的折射率分布,这就是“Hill”光栅的形成,是首次关于光纤光栅的研究报道。事实上,该研究成果在当时并未引起重视,主要原因包括光纤光栅的写入制作技术效率不高,并且写入的光栅波长局限于激光光源的波长,导致光栅技术发展缓慢。

直至1989年,美国 United Technologies Research Center 的 Morey 等^[15]提出了一种紫外刻写的分振幅干涉法,使得光纤光栅的制作效率显著提高,并且首次将光纤光栅用于传感检测,阐述了光栅对应变和温度参数的敏感原理,有力地推进了光纤光栅作为传感元件的发展。此后,光纤光栅传感技术迎来了蓬勃发展的时期,基于光纤光栅传感的检测、监测技术在土木工程、机械装备、医疗医学、航空航天等领域得到深入研究并广泛应用。

光纤光栅传感与其他几种原理的光纤传感(如 BOTDR、F-P 等)相比,其采用绝对波长信息检测,波长值不受光源功率波动影响,且单根光纤可串接多个不同波长的光栅^[16]。光纤光栅基本可分为4类:光纤 Bragg 光栅(FBG)、闪耀光纤光栅、啁啾光纤光栅和长周期光纤光栅。光纤 Bragg 光栅作为最早研究发现的光栅,在当今光纤光栅传感领域应用最为广泛^[17]。

光纤 Bragg 光栅的传感原理如图1所示(图中 ϕ 表示直径):Bragg 光栅经激光刻写于细微的单模光纤纤芯中,使用宽带光入射于光纤内作为信号光源,光纤 Bragg 光栅反射特定波长的光信号,即经过光栅后的透射光信号出现“塌陷”,而被光栅反射回的光信号为峰状光谱,当刻有光栅处的光纤受到温度和轴向应变作用时,该反射光谱产生漂移,中心波长值发生规律性变化。光纤 Bragg 光栅的中心波长值的漂移量与其所处环境温度和所受轴向应变的关系为^[18]

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (\alpha_f + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\epsilon, \quad (1)$$

式中 λ 为光纤 Bragg 光栅初始的中心波长, $\Delta\lambda$ 为光栅的波长漂移量, α_f 为光纤的热膨胀系数, ξ 为光纤材料的热光系数, P_e 为光纤的弹光系数。(1)式即为光纤 Bragg 光栅对应变和温度参数检测的传感原理。

由于 Bragg 光栅以细微的光纤为载体,体积小、质量轻,其径向尺寸仅为 125 μm ,轴向长度可短至 2 mm 以内;以光为传感信号,不受电磁干扰的影响,信号抗干扰、稳定性强,且波长值无温度零点漂移,特种光栅可耐 1000 $^{\circ}\text{C}$ 以上的高温;同一根光纤上可以串接多个不同中心波长的光栅测点,大幅减少传感器的信号引线数量。

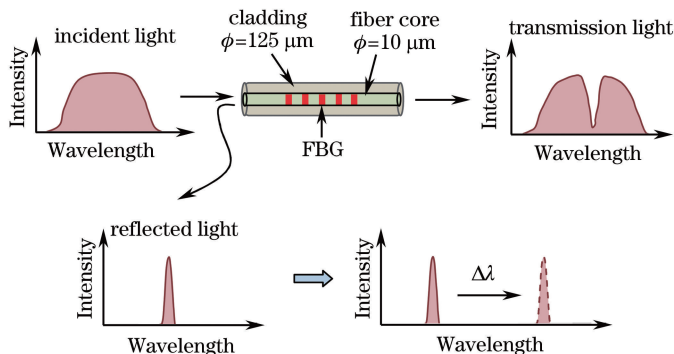


图 1 光纤 Bragg 光栅传感原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sensing principle of fiber Bragg grating

3 基于 FBG 原理的力/力矩触觉传感检测技术研究进展

FBG 的基本测量物理量是温度和应变,为实现对力/力矩信息的检测,一般是将多个 FBG 组成阵列后敷设在专门设计的弹性结构体上,这与基于传统应变片的检测方式类似,特殊情况下,也可直接将刻有 FBG 的光纤自身作为传感弹性体。如图 2 所示,当有外界力或力矩载荷作用时,弹性体或者光纤产生的应变、位移等形变信息作用于 FBG 上,引起 FBG 的栅距变化,从而带来 FBG 中心波长的漂移,通过检测该波长的漂移信息来表征所受的外界力或力矩载荷信息。由于 FBG 的传感信号为光波长,需采用专门的光纤光栅波长解调器对其进行调制/解调处理,将其在外界载荷作用下的波长漂移信息呈现出来。

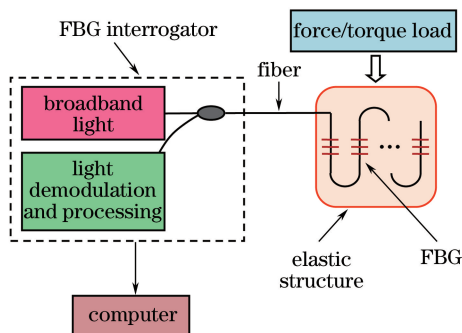


图 2 基于 FBG 的力/力矩检测原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of force/torque sensing principle based on FBG

3.1 FBG 多维力/力矩传感技术

多维力/力矩传感器可同时检测多个方向上的力和力矩信息,是机器人控制系统的核心仪器之一。在 20 世纪 70 年代初,为满足机器人控制对多维力/力矩信息的迫切需求,开始研制多维力传感器,美、日、德等极少数国家率先研发出传感器产品。我国在该技术上的自主研究始于 20 世纪 80 年代,主要集中于中国科学院、哈尔滨工业大学、东南大学等有机器人研究背景的单位。

目前文献报道的多维力传感器以及市场上传感器产品中,电阻应变片原理型的传感器占据主导,自 1989 年光纤 Bragg 光栅技术逐渐为世人熟知后,FBG 显著的技术优势引起了多维力/力矩信息检测领域研究者的重视。2001 年,比利时核能研究中心的 Fernandez 等^[19]利用传统的多维力传感弹性结构——十字梁结构(如图 3 所示,图中 TLS 为可调谐激光光源,OSA 为光谱分析仪),将 8 个不同波长的 FBG 分别布置在 4 个横梁的上下表面,当有外部载荷作用时,处于上下表面上的 1 对 FBG 互为反向漂移的波长变化量的差值作为测量信息,消除了温度变化带来的同向波长漂移影响,可实现对 Z 方向上的力和 X、Y 方向上力矩的测量,这是基于 FBG 元件实现多维力/力矩测量的首次报道。

2007—2009 年,斯坦福大学的 Park 等^[20-21]首次将 FBG 用在由复合材料制造的机器人仿生手指中,5 个 FBG 嵌入到中空工业机器人手指结构内部,用于获取机器人抓取物体的作用力实时变化情况(见图 4)。

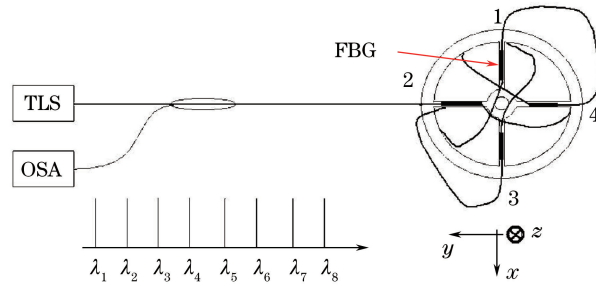


图 3 FBG 多维力传感结构体

Fig. 3 Sensing structure of multi-component force sensor based on FBG

他们将 4 个 FBG 周向间隔 90° 嵌入到专门制造的网状弹性手指壳的内表面, 间隔 180° 的 2 个 FBG 组成 1 个测量单元, 2 组测量单元即可检测手指受到的二维方向作用力, 另外 1 个 FBG 置入手指中心的铜管内, 处于自由状态, 为测力的 4 个光栅提供温度补偿。灵敏度、蠕变等性能的力学测试结果表明, 该机器手指可分辨出 0.1 N 的抓取力。

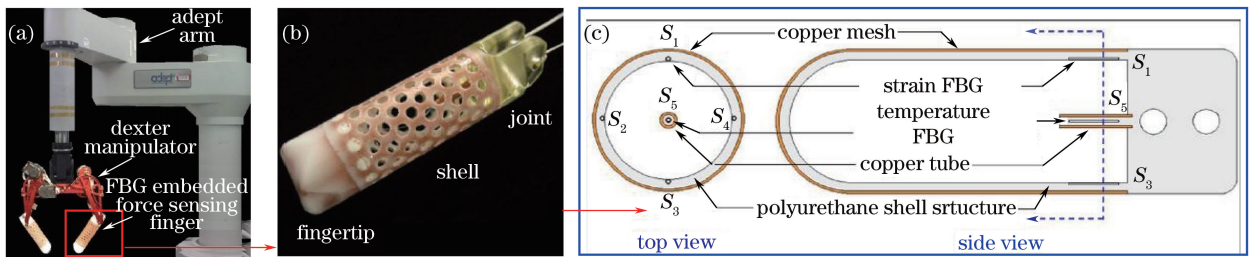


图 4 斯坦福大学研制的二维指尖抓取力传感器

Fig. 4 Two dimensional fingertip force sensor developed in Stanford University

同期, 德国慕尼黑工业大学(TUM)的 Mueller 等^[22-23]设计了一种 FBG 六维力传感器。如图 5 所示, 传感结构体类似于常见的斯图尔特平台, 刻写在同一根光纤上的 6 个 FBG 经拉紧后缠绕布置于传感体上的微型凹槽中, 6 个 FBG 沿传感体的周向间隔 120° 分为 3 组, 每组的 2 个 FBG 交叉布置。预拉紧的 FBG 具备了同时测量正应变和负应变的能力, 由于 FBG 不粘贴固定在传感体上, 可避免光栅因受非均匀应变作用而产生的啾啾现象。在外界 6 个方向上的力或力矩作用下, 6 个 FBG 的波长产生相应的漂移, 但该传感体输出存在维间耦合, 文中未对传感器做出各维力载荷实验和解耦输出分析。

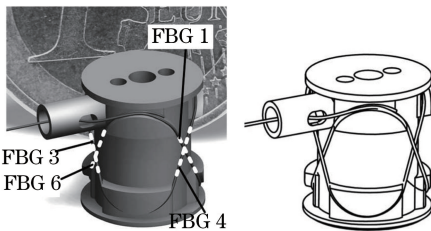


图 5 慕尼黑工业大学提出的 FBG 六维力传感器

Fig. 5 FBG based six dimensional force sensor developed in TUM



图 6 山东大学提出的 FBG 三维腕力传感器

Fig. 6 FBG based three dimensional wrist force sensor developed in Shandong university

在国内, 2013 年至 2014 年, 山东大学的蒋奇等^[24-26]提出了一种基于 FBG 的机器人腕力传感器。如图 6 所示, 传感体含有 3 个间隔 120° 的弹性梁, 在梁的上表面分别粘贴 FBG, 可实现 Z 方向力、X 和 Y 方向力矩的三维信息检测, 文中数值分析了受力和模态因素对该结构的影响, 及对 Z 方向作用力和动态冲击的影响。

随着手术机器人的发展, 机器人手术的精准性得到了外科医生的广泛认可, 但与人工手术相比, 机器人手术时器械臂和人体之间的力作用情况难以实时准确地反馈给控制人员, 这无疑会增加手术的盲目性和风险性^[11-12, 27]。近几年来, 国内外学者在手术机器人的多维力/力矩检测技术领域开展了大量工作, 基于传统的电阻应变计、MEMS 等技术原理的传感技术都被涉及, 但这些传感技术都受到体积大、引线数量多、信号

稳定性差、不易于消毒处理等限制,而 FBG 传感技术因便于集成到微小的器械系统、抗电磁干扰能力强、波长信号不受信号光源功率波动影响等优势而在该领域的研究中发挥着主导作用。

2011 年,韩国科学技术学院(KAIST)的 Song 等^[28-29]利用 FBG 体积小、可消毒性良好等优势,研制了一种微创手术钳三维力/力矩测量系统,如图 7 所示,4 支 FBG 粘贴在专门设计的 4 分梁结构上,同时设置 4 个温度补偿 FBG,构成测力传感器,该传感器与手术钳并联串接,测量手术臂的 F_z 、 M_x 和 M_y 等 3 个轴向力信息,测力分辨率可达 0.05 N。

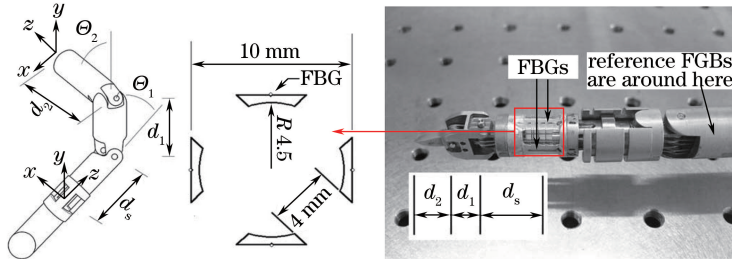


图 7 KAIST 研制的 FBG 三维力/力矩传感器

Fig. 7 FBG based three dimensional force/torque sensor developed in KAIST

2013 年,德国宇航中心的 Haslinger 等^[30]设计了一种用于机器人微创手术力/力矩觉检测的 FBG 六维力传感器,如图 8 所示。这种传感器采用并联机构形式,其外径 Φ 和高度分别仅为 6.4 mm 和 6.5 mm,易与微小的机器人手术臂串联融合。6 个 FBG 分别嵌入至并联机构的 6 个连杆内,另外还设置有 1 个温度测量 FBG,整个传感器非常精密紧凑,六维力和力矩载荷测试结果表明,在最大的 20 N 力和 $1.5 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$ 的力矩作用下传感器仍可正常工作,表现出了良好的多维力测量能力。

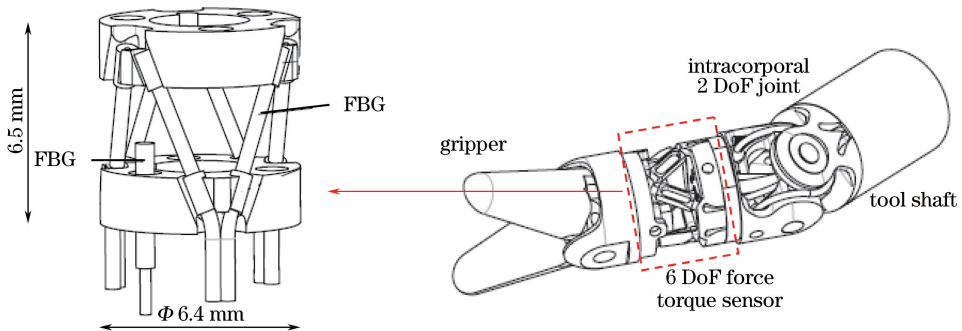


图 8 德国宇航中心设计的 FBG 六维力传感器

Fig. 8 FBG based six dimensional force/torque sensor developed in German aerospace center

2009—2014 年,约翰霍普金斯大学的 He 等^[31-33]一直致力于研究能够用于视网膜微创手术机器人的高分辨率力觉传感技术,在探索试验了包括电阻应变计、微型机电系统(MEMS)等技术后,最终选定了 FBG 传感技术,主要原因就是 FBG 信号稳定、易于消毒处理、体积微小、具备集成到亚毫米级探针上的可行性等优势。在此 5 年间,该研究小组将初始的单维力传感逐步发展到三维力传感,采取的基本传感方法就是将单个或者多个 FBG 嵌入或周向嵌入到手术探针内。如图 9 所示,单维的力觉传感中,在探针端部植入一个 FBG [见图 9(a)];二维测力传感时,沿探针周向间隔 120° 布置 3 个 FBG [见图 9(b)],二维径向力作用下产生的应变分解作用在 3 个 FBG 上,再根据 FBG 的波长变化情况反演出 2 个方向上的力;三维测力时,在二维测力方法的基础上,在探针中心再增加一个测量轴向力的 FBG [图 9(c)]。这些传感器的力分辨率可达 0.25 mN,在实际手术测试中,对探针与人体组织作用力的测量表现出了良好的稳健性。与此研究类似的还有,2014 年比利时鲁汶大学的 Gijbels 等^[34]将 3 个 FBG 嵌入到机器人视网膜手术探针的端部(如图 10 所示,OD 指外径,ID 指内径),实现二维力测量,测量分辨率也达到了 0.25 mN。

2013—2014 年,哈佛大学和斯坦福大学在医疗检查探针内部嵌入分布式的 FBG 测点^[35-36],不但可进行三维的力觉检测,还可实时呈现探针的三维弯曲形状,这对实时追踪探针的轨迹状态、掌握探针与人体组织

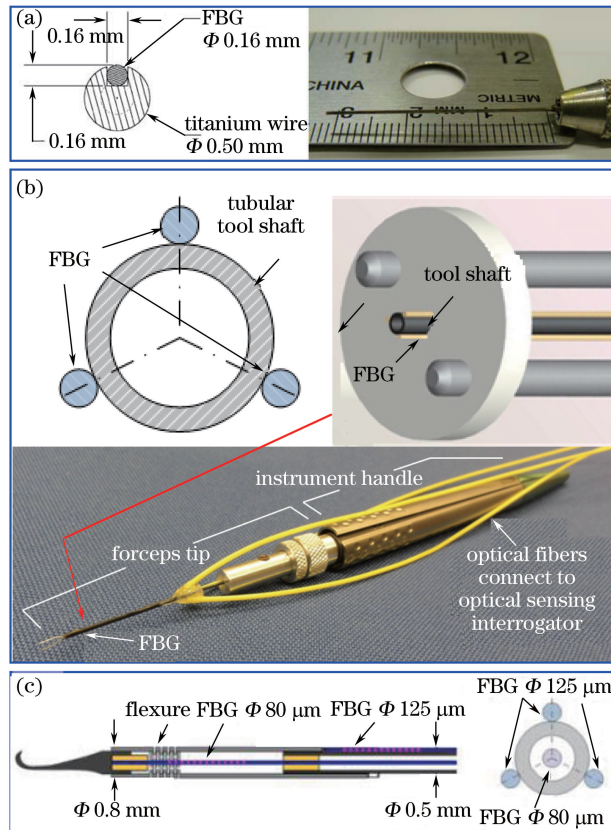


图 9 约翰霍普金斯大学提出的视网膜手术探针 FBG 力传感技术。

(a) 单维；(b) 二维；(c) 三维

Fig. 9 Micro-forceps with integrated FBG for vitreoretinal surgery developed in Johns Hopkins university.

(a) One dimension; (b) two dimension; (c) three dimension

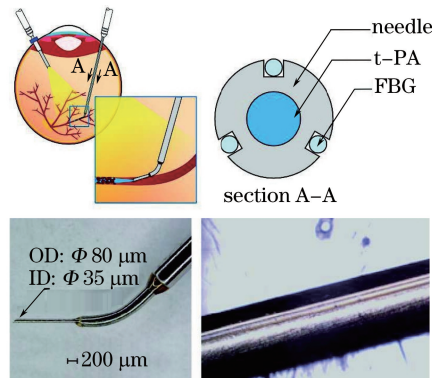


图 10 比利时鲁汶大学研制的 FBG 二维力觉探针

Fig. 10 Two dimensional force sensing needle with embedded FBG developed in Katholieke Universiteit Leuven

的作用情况非常重要,有助于手术的顺利开展。这种探针中的 FBG 通过周向间隔 120° 嵌入至特殊预留的探针微型槽内而得(如图 11)。FBG 进行弯曲状态检测时,将探针作为悬臂梁,根据 FBG 检测到的受力弯曲应变来反演出探针的弯曲状态。

3.2 FBG 力触觉传感技术

广义上来讲,3.1 节介绍的多维力/力矩也属于力触觉的范畴。此处我们将类似于人工皮肤型的分布式点阵触觉技术^[37]归类总结,重点介绍近年来基于 FBG 的新型力触觉传感技术研究概况。

目前最常见的分布式点阵触觉设计是将多个 FBG 测点垂直交叉布置成应变感知阵列,多个 FBG 或直接交叉平铺后嵌入至复合材料中,或固定于特殊设计的敏感结构,形成传感体后再组为阵列。2005—2009

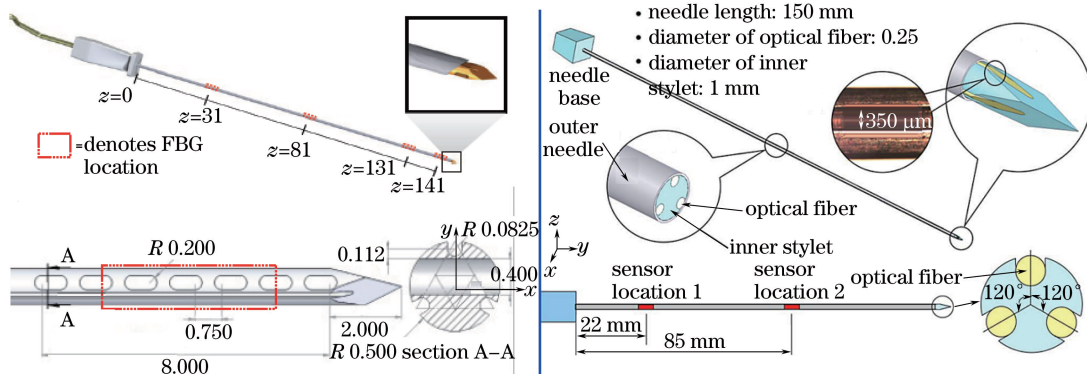


图 11 哈佛大学和斯坦福大学研制的 FBG 力觉探针

Fig. 11 Force sensing needles with embedded FBG developed in Harvard university and Stanford university

年,KAIST 的 Heo 等^[38-43]致力于 FBG 点阵式触觉传感技术的研究。研究初期,该研究小组将 1 个 FBG 嵌入至 1 个直径为 100 mm 的聚二甲硅氧烷(PDMS)圆盘内(如图 12, λ_B 为 Bragg 光纤光栅的 Bragg 波长),构成 1 个单点的触觉压力传感器,当有压力作用在传感器表面时,FBG 的波长发生改变^[38]。

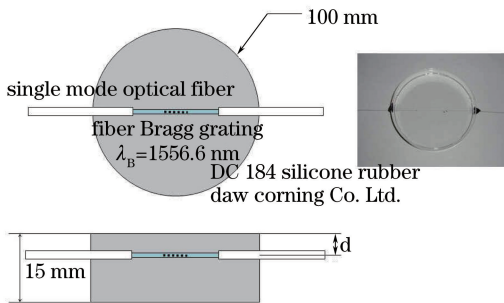


图 12 KAIST 研制的嵌入式 FBG 压力传感器

Fig. 12 PDMS flexible force sensor with embedded FBG developed in KAIST

后来,他们将圆盘改进为带有中心凸台的结构形式^[39][见图 13(a)],在分析其应变分布规律的基础上,将 FBG 优化布置嵌入至中心凸台的下方,这种改进后的压力传感器的力分辨率达到 0.005 N,采用 9 个该 FBG 压力传感器组成 3×3 的压力感知阵列[见图 13(b)],并实施压力感知测试,测量结果有效反映出了实际的压力分布。

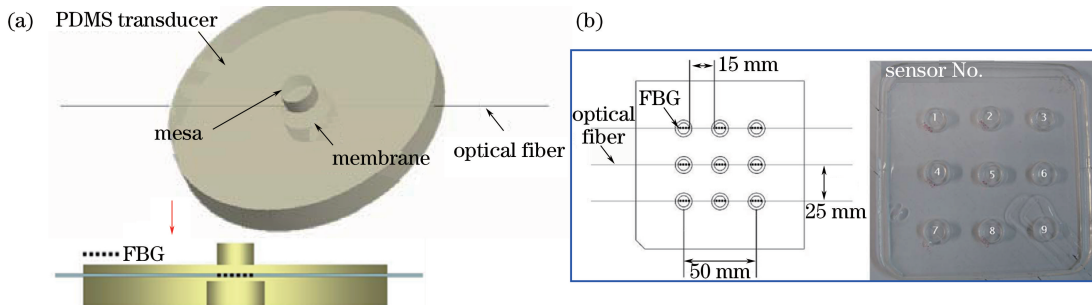


图 13 KAIST 研制的凸台型 FBG 压力传感器。

(a) 单个测点; (b) 测点阵列

Fig. 13 FBG force sensor with mesa developed in KAIST. (a) Single measuring point; (b) measuring point array

2006 年,该研究团队又提出了一种“桥型”的弹性感知结构^[40-41][见图 14(a)],FBG 穿过桥型结构两侧的孔后被固定,在压力作用下,结构产生伸缩变形,结构内侧空间里的 FBG 波长发生相应变化,图 14(b)是布置有 FBG 压力传感的结构照片,弹性体的材料为铍铜合金。该桥型压力传感器与先前的嵌入式硅橡胶盘传感器相比,FBG 处于拉紧悬空状态,弹性结构变形时,FBG 受到的应变均匀,光谱未产生啁啾现象,传感质量得到进一步提高,其压力分辨率与硅橡胶盘型的相比也有大幅提高,达到了 0.001 N。该研究同样使用 9

个“桥型”压力传感器组成 3×3 的压力感知阵列,并将其布置于外科手术指尖用到的手套上[见图 14(c)],用于手术触觉反馈,力学测试显示其触觉测量效果良好。此后,从 2007 年开始,该研究小组在上述几种传感体基础上,尝试基于光纤微弯效应的压力测点技术,使压力测点变得更加密集,测点的力分辨率为 $0.05 \text{ N}^{[42-43]}$ 。

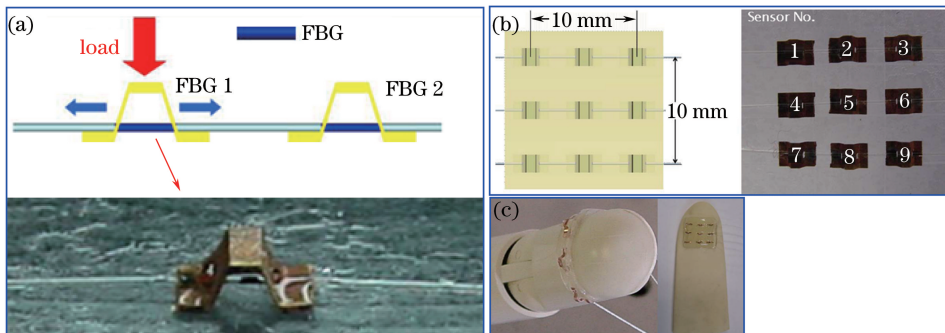


图 14 KAIST 研制的“桥型”FBG 压力传感体与其组成的触觉点阵及应用。

(a) 单个测点; (b) 测点阵列; (c) 触觉指尖

Fig. 14 Bridge type FBG force sensor developed in KAIST and its application.

(a) Single measuring point; (b) measuring point array; (c) tactile fingertip

与 Heo 等提出的嵌入式 FBG 硅橡胶压力传感技术类似,2007 年,英国阿斯顿大学的 Cowie 等^[44]将 FBG 嵌入至 1 个外径为 50 mm 的弧状聚硅氧烷材料的手指贴片中[见图 15(a)],用于测量手指触觉力;同年,该小组还将 4 支 FBG 等间距布置在 1 个薄不锈钢片表面,构成 1 个触点载荷传感体,以及将 9 支 FBG 组成 1 个 3×3 的测点阵列,粘贴在不锈钢片表面,形成分布式触觉传感^[45][见图 15(b)],并引入了神经网络数据处理方法,对压力测试数据进行分析,测量结果与实际情况吻合。

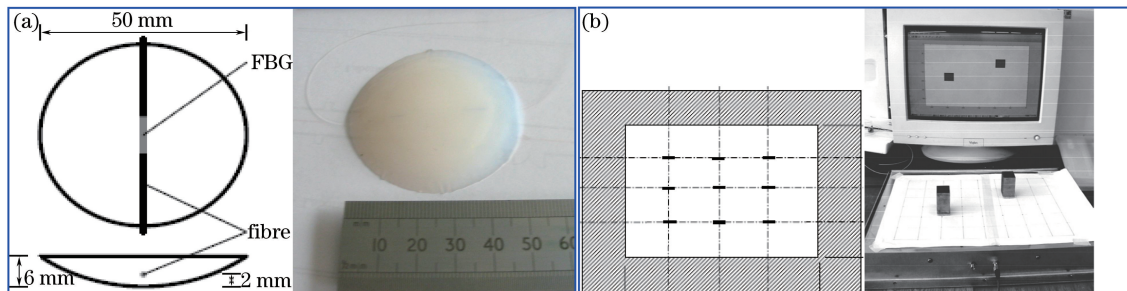


图 15 英国阿斯顿大学研制的 FBG 触觉传感体。(a) 指尖触觉膜; (b) 分布式触觉传感

Fig. 15 FBG tactile sensor developed in Aston university. (a) Tactile fingerfilm; (b) distributed tactile sensor

2014—2015 年,罗马生物医药大学(UCBM)从事生物医学机器人研究的 Saccomandi 等^[46-47]设计了一种矩形 PDMS 材料的触觉薄膜体(见图 16),在这种聚合物薄膜上设置专门的凹槽结构,凹槽结构呈 3×3 规则分布于整个矩形薄膜体内,每个凹槽处的上表面敷设有 FBG,进而形成 FBG 测点阵列,该触觉传感的精

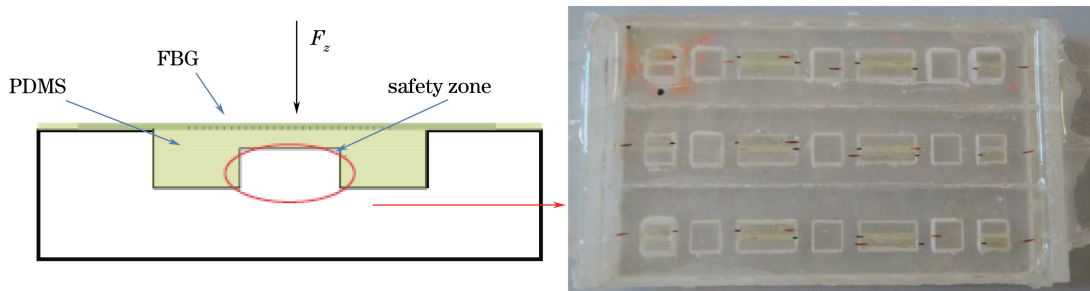


图 16 罗马生物医药大学研制的 FBG 触觉传感体

Fig. 16 FBG tactile sensor developed in UCBM

度达到了毫牛级,将在机器人核磁共振检查中提高触觉反馈。

同样在 2015 年,我国山东大学的 Song 等^[48]在对一种矩形 PDMS 片进行压力分布优化分析的基础上,将 9 个 FBG 按照优化的间距呈 3×3 阵列布置在一个矩形模具内[见图 17(a)],浇入液态的 PDMS,经过 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境凝固后,FBG 自动嵌入至 PDMS 内,形成整体性良好的传感体[见图 17(b)]。压力实验时,分别开展了作用区域大小不同、位置不同的触觉测试,FBG 测量结果与实际情况吻合。

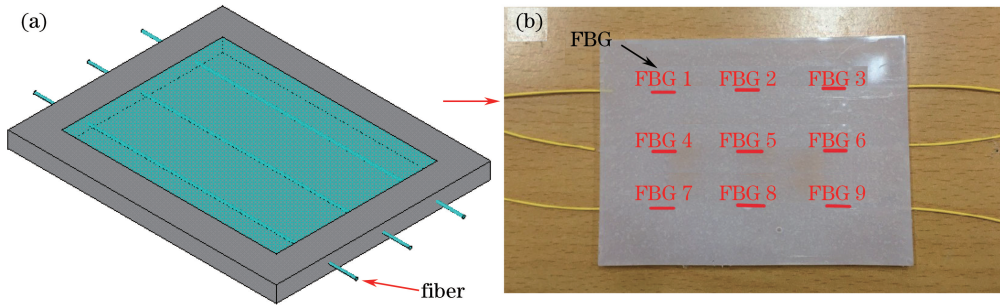


图 17 山东大学研制的 FBG 嵌入式触觉传感阵列。

(a) 传感器制造装置; (b) 分布式触觉传感

Fig. 17 Tactile sensor with embedded FBG array developed in Shandong university.

(a) Sensor manufacturing device; (b) distributed tactile sensor

4 结束语

综上所述,基于新型 FBG 技术的多维力/力矩和分布式触觉传感技术的研究热点主要集中于传感方法、弹性结构体的构建与设计,在借鉴经典电测原理传感结构的基础上,不断提出新的传感构型。由于 FBG 技术自身的发展时间并不长,其传感特性、传感工艺等也在被不断研究与发展。目前的研究报道中,仅是将 FBG 作为一种特殊的应变片来使用,利用的只是其体积小、可嵌入等直观的外部优势,并未充分发挥 FBG 元件深层的光学应变机理、特殊的波长信息检测等优势,还需将 FBG 传感元件的物理机理、光学机理的研究与机器人力学检测环境的要求紧密结合,将 FBG 传感的光电信息处理与机器人的信息处理系统进行技术融合,将 FBG 与其他几种原理的光纤传感技术相结合,优势互补^[42-43,49],才能更好地促进 FBG 力传感技术的发展,这也是机器人光纤智能感知领域亟待深入研究的科学问题:

1) 深入研究多维力/力矩作用下弹性结构体的应变变形特征与 FBG 输出光谱的变化行为之间的联系、弹性结构体的应变分布特点与 FBG 波长检测方式之间的联系,有望设计出更加适合于 FBG 元件的新传感构型,如实现低耦合、新型解耦方法等。

2) 特制的 FBG 具有耐高温、超高精度等优势,利用 FBG 的这种特性,将有望研制出适用于高温、恶劣环境中的机器人所需的耐高温力学传感器。

3) 将 FBG 元件光调制解调的信息检测与现有机器人普遍采用的电信号通信进行融合与协同。目前 FBG 解调分析器价格不菲,且都是独立型仪器,未能像电测信号传感器一样易于与机器人融合,因此还需将 FBG 的光电检测与机器人系统集成,实现对接。

4) 分布式阵列型触觉中,当前 FBG 的测点普遍为简单的 3×3 形式,可进一步拓展阵列数量,将 FBG 嵌入高性能的复合材料中,采用先进的信息处理方法,使其在智能服装、穿戴式人工皮肤等技术领域发挥重要作用。

当前的研究报道也表明,光纤光栅原理的力/力矩触觉传感是新兴技术,国外对此研究也处于起步阶段,集中于机器人微创手术臂力觉、医疗人体探针力觉、机器人手手指触觉等重要多维力信息的 FBG 检测技术及实际应用研究;国内的研究则刚刚起步,山东大学在 FBG 多维力/力矩传感技术、触觉传感技术方面,北京交通大学在医疗穿刺针尖的触觉检测方面开展了相关研究工作,并制作出了传感器原型等。随着光纤光栅技术的飞速发展,在深入研究解决光纤的应变感知机理、光信息和电信息处理融合、不同形式的光纤传感融合等技术问题的基础上,光纤光栅必将在机器人传感技术领域发挥越来越重要的作用。

参 考 文 献

- 1 Ge Yunjian, Zhang Jianjun, Ge Yu, *et al.*. Ubiquitous sensing and robot perception[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(s1): 125-133.
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(增刊): 125-133.
- 2 Ge Yu, Wu Zhongcheng, Ge Yunjian. State of arts and development trends toward application-oriented force/torque sensors[J]. *Robot*, 2003, 25(2): 188-192.
戈 瑜, 吴仲城, 葛运建. 面向应用需求的力/力矩传感器技术发展动向[J]. *机器人*, 2003, 25(2): 188-192.
- 3 Liu Jinguo, Wang Yuechao, Li Bin, *et al.*. Current research, key performances and future development of search and rescue robot[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(12): 1-12.
刘金国, 王越超, 李 斌, 等. 灾难救援机器人现状、关键性能及展望[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(12): 1-12.
- 4 Tan Min, Wang Shuo. Research progress on robotics[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(7): 963-972.
谭 民, 王 硕. 机器人技术研究进展[J]. *自动化学报*, 2013, 39(7): 963-972.
- 5 Song Guoli, Han Jianda, Zhao Yiwen. Review of orthopedic surgical robot and navigation technology[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(s2): 8-19.
宋国立, 韩建达, 赵忆文. 骨科手术机器人及其导航技术[J]. *科学通报*, 2013, 58(增刊II): 8-19.
- 6 Zhao Xingang, Yang Tangwen, Han Jianda, *et al.*. A review on the robot-assisted needle puncture technology[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(s2): 20-27.
赵新刚, 杨唐文, 韩建达, 等. 机器人辅助针穿刺技术[J]. *科学通报*, 2013, 58(增刊II): 20-27.
- 7 Guo Song, Yang Mingjie, Tan Jun. A big challenge of surgical robot——haptic feedback[J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2014, 32(4): 499-503.
郭 松, 杨明杰, 谭 军. 手术机器人面临的一大挑战——力触觉反馈[J]. *中国生物医学工程学报*, 2014, 32(4): 499-503.
- 8 Jiang Junfeng, He Pan, Liu Tiegeng, *et al.*. Research of temperature-stable fiber Bragg grating sensing demodulation based on composite wavelength references[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1006005.
江俊峰, 何 盼, 刘铁根, 等. 基于复合波长参考的温度稳定光纤光栅传感解调研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1006005.
- 9 Liu Feng, Ma Wenlong, Guo Xuan. Study on radial pressure sensing characteristics of EVA sensitivity enhanced fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1006001.
刘 丰, 马文龙, 郭 璇. EVA增敏的光纤光栅径向压力传感特性研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1006001.
- 10 Chen Haiyun, Gu Zhengtian, Gao Kan. Multi-parameter photochemical sensing technology of long-period fiber grating and wavelength division multiplexing[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0205003.
陈海云, 顾铮先, 高 侃. 基于波分复用的长周期光纤光栅光化学多参量传感技术研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0205003.
- 11 Abushagur A A G, Arsal N, Reaz M I, *et al.*. Advances in bio-tactile sensors for minimally invasive surgery using the fibre Bragg grating force sensor technique: A survey[J]. *Sensors*, 2014, 14(4): 6633-6665.
- 12 Taffoni F, Formica D, Saccomandi P, *et al.*. Optical fiber-based MR-compatible sensors for medical applications: An overview[J]. *Sensors*, 2013, 13(10): 14105-14120.
- 13 Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, *et al.*. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication[J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(10): 647-649.
- 14 Kawasaki B S, Hill K O, Johnson D C, *et al.*. Narrow-band Bragg reflectors in optical fibers[J]. *Optics Letters*, 1978, 3(2): 66-68.
- 15 Morey W W, Meltz G, Glenn W H. Fiber optic Bragg grating sensors[C]. *SPIE*, 1989, 169: 98-107.
- 16 Xiong L, Zhang D S, Li L T, *et al.*. EFPI-FBG hybrid sensor for simultaneous measurement of high temperature and large strain[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(12): 120605.
- 17 Li Chuan, Zhang Yimo, Zhao Yonggui, *et al.*. *Fiber grating: Principles, techniques, and sensing applications*[M]. Beijing: Science Press, 2005.
李 川, 张以谟, 赵永贵, 等. *光纤光栅: 原理、技术与传感应用*[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

- 18 Kersey A D, Davis M A, Patrick H J, *et al.*. Fiber grating sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1442-1463.
- 19 Fernandez A, Berghmans F, Brichard B, *et al.*. Multi-component force sensor based on multiplexed fibre Bragg grating strain sensors[J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12: 810-813.
- 20 Park Y L, Ryu, Black R J, *et al.*. Fingertip force control with embedded fiber Bragg grating sensors[C]. 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008: 3431-3436.
- 21 Park Y L, Ryu S C, Black R J, *et al.*. Exoskeletal force-sensing end-effectors with embedded optical fiber-Bragg-grating sensors[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2009, 25(6): 1319-1331.
- 22 Mueller M S, Hoffmann L, Buck T S, *et al.*. Realization of a fiber-optic force-torque sensor with six degrees of freedom [C]. SPIE, 2008, 7266: 72660S.
- 23 Mueller M S, Hoffmann L, Buck T S, *et al.*. Fiber Bragg grating-based force-torque sensor with six degrees of freedom [J]. International Journal of Optomechatronics, 2009, 3(3): 201-214.
- 24 Jiang Qi, Gao Fangfang, Li Yibin, *et al.*. Design and research of wrist force sensor based on FBG [C]. IEEE International Conference on Information and Automation, 2013: 390-395.
- 25 Gao Fangfang. Research of multi-dimensional force sensing technology based on fiber Bragg grating[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
高芳芳. 基于光纤光栅的多维力传感技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- 26 Jiang Qi, Song Jinxue, Gao Fangfang, *et al.*. Research of robot multidimensional force sensing technology based on fiber Bragg grating[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2014, 25(11): 2123-2129.
蒋奇, 宋金雪, 高芳芳, 等. 基于光纤光栅的机器人多维力传感技术研究[J]. 光电子·激光, 2014, 25(11): 2123-2129.
- 27 Fu Yili, Li Kun, Pan Bo, *et al.*. A survey of force sensing and force feedback technology for robot-assisted minimally invasive surgical system[J]. Robot, 2014, 36(1): 117-128.
付宜利, 李坤, 潘博, 等. 微创手术机器人力检测与力反馈技术研究现状[J]. 机器人, 2014, 36(1): 117-128.
- 28 Song H, Kim H, Jeong J, *et al.*. Development of FBG sensor system for force-feedback in minimally invasive robotic surgery[C]. 2011 IEEE Fifth International Conference on Sensing Technology, 2011: 16-20.
- 29 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]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(7): 074301.
- 30 Haslinger R, Leyendecker P, Seibold U. A fiberoptic force-torque-sensor for minimally invasive robotic surgery[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2013: 4390-4395.
- 31 He X, Balicki M A, Kang J U, *et al.*. Force sensing micro-forceps with integrated fiber Bragg grating for vitreoretinal surgery[C]. SPIE, 2012, 8218: 82180W.
- 32 Gonenc B, Handa J, Gehlbach P, *et al.*. Design of 3-DOF force sensing micro-forceps for robot assisted vitreoretinal surgery[C]. 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2013: 5686-5689.
- 33 He X, 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.
- 34 Gijbels A, Reynaerts D, Stalmans P, *et al.*. Design and manufacturing of a 2-DOF force sensing needle for retinal surgery [C]. 4th Joint Workshop on New Technology for Computer/Robot Assisted Surgery, 2014: 12-15.
- 35 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.
- 36 Elayaperumal S, Bae J H, Christensen D, *et al.*. MR-compatible biopsy needle with enhanced tip force sensing[C]. IEEE World Haptics Conference (WHC), 2013: 109-114.
- 37 Yang Y J, Cheng M Y, Shih S C, *et al.*. A 32×32 temperature and tactile sensing array using PI-copper films[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 46(9-12): 945-956.
- 38 Heo J S, Lee J J. Development of flexible force sensors using fiber Bragg grating for tactile sensing and its evaluation[C]. SPIE, 2005, 5852: 372-378.
- 39 Heo J S, Chung J H, Lee J J. Application of optical fiber sensor for the tactile sensor system[C]. 1st International

- Conference on Sensing Technology, 2005: 32-37.
- 40 Heo J S, Lee J J. Temperature sensor array for tactile sensation using FBG sensors[C]. 5th IEEE Conference on Sensors, 2006: 1464-1467.
- 41 Heo J S, Chung J H, Lee J J. Tactile sensor arrays using fiber Bragg grating sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2006, 126(2): 312-327.
- 42 Heo J S, Han C H, Lee J J. System design and evaluation of the robot tactile sensor using the microbending fiber optic sensors[C]. The 16th IEEE International Conference on Robot and Human interactive Communication, 2007: 14-18.
- 43 Heo J S, Kim J Y, Lee J J. Tactile sensors using the distributed optical fiber sensors[C]. 3rd International Conference on Sensing Technology, 2008: 486-490.
- 44 Cowie B, Allsop T, Williams J, *et al.*. An optical fiber Bragg grating tactile sensor[C]. SPIE, 2007, 6585: 65850I.
- 45 Cowie B M, Webb D J, Tam B, *et al.*. Fiber Bragg grating sensors for distributive tactile sensing[J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18(1): 138.
- 46 Saccomandi P, Caponero M A, Polimadei A, *et al.*. An MR-compatible force sensor based on FBG technology for biomedical application[C]. 36th Annual International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2014: 5731-5734.
- 47 Saccomandi P, Oddo C M, Zollo L, *et al.*. Feedforward neural network for force coding of an MRI-compatible tactile sensor array based on fiber Bragg grating[J]. Journal of Sensors, 2015, 2015: 1-9.
- 48 Song Jinxue, Jiang Qi, Huang Yuanyang, *et al.*. Research on pressure tactile sensing technology based on fiber Bragg grating array[J]. Photonic Sensors, 2015, 5(3): 263-272.
- 49 Yang Tangwen, Chen Panfei, Hang Jianda, *et al.*. Wavelet transform analysis of optic fiber force sensing signals at puncture needle tip[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(8): 2149-2157.
- 杨唐文, 陈盼飞, 韩建达, 等. 穿刺针尖光纤力传感信号的小波变换分析[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2149-2157.