

# 激光与光电子学进展

## 多芯光纤形状传感研究进展

夏启<sup>1</sup>, 王洪业<sup>1</sup>, 杨世泰<sup>1</sup>, 王东辉<sup>1</sup>, 苑立波<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>哈尔滨工程大学物理与光电工程学院纤维集成光学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

<sup>2</sup>桂林电子科技大学电子工程与自动化学院光子学研究中心, 广西 桂林 541004

**摘要** 多芯光纤在空分复用方面独特的优势引起了人们越来越多的关注,在光纤传感领域也有了更为广泛的应用。多芯光纤形状传感是一种新的光纤感测技术,该技术通过多芯光纤感知被测对象形状和位置的变化,无需依靠其他视觉辅助手段,此外,该技术还具有结构紧凑灵活、不受电磁干扰、易集成安装、传感器无电学连接的优点,可用于航空航天、工业机械和大型建筑等领域的结构监测、地理环境和线缆管道监测、介入治疗追踪等。为此,介绍了多芯光纤的种类及其关键器件的制备方法,并且对多芯光纤形状传感的原理与技术进行了分析,最后综述了多芯光纤形状传感的研究进展,讨论了多芯光纤形状传感当前挑战和未来展望。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感; 多芯光纤; 形状传感; 光纤器件

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1306012

## Research Development of Multi-Core Optical Fiber Shape Sensing Technology

Xia Qi<sup>1</sup>, Wang Hongye<sup>1</sup>, Yang Shitai<sup>1</sup>, Wang Donghui<sup>1</sup>, Yuan Libo<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of In-fiber Integrated Optics, Ministry of Education, School of Physics and Optoelectronic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

<sup>2</sup>Photonics Research Center, School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

**Abstract** Multi-core fiber with the unique advantages in space division multiplexing has attracted more attention in many fields. As a new technology of optical fiber sensing, multicore fiber shape sensing technology can be used to detect the three-dimensional shape and the position without other visual aids. Meanwhile, this technology shows the characteristics of compact structure and easy integration without electromagnetic interference, which can be applied in aerospace, industrial machinery and building structure monitoring, interventional therapy tracking and other fields. This article reviewed the latest progress of multicore fiber shape sensing in recent years, and the key technique of shape sensing technology, are covered in detail. Finally, challenges and future perspectives of multi-core fiber shape sensing in practical applications are discussed.

**Key words** fiber optics; optical fiber sensing; multi-core optical fiber; shape sensing; optical fiber device

**OCIS codes** 060.2370; 280.4788; 060.3735; 060.2340

收稿日期: 2021-04-01; 修回日期: 2021-05-17; 录用日期: 2021-05-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB2203903)、国家自然科学基金(61827819, 61735009)、广西创新驱动科技重大专项(AA18242043)

通信作者: \*lbyuan@vip.sina.com

## 1 引言

经过几十年的发展,形状传感技术发展为传统形状传感和光纤形状传感<sup>[1]</sup>。传统形状传感包括非接触式形状传感(如图像检测<sup>[2]</sup>、雷达检测<sup>[3]</sup>、激光扫描<sup>[4]</sup>等)和接触式形状传感(电阻应变片<sup>[5]</sup>等)。而近年来,光纤形状传感以其极大的应用潜力成为了新的研究热点,如在航空航天、工业机械、生物医学等领域以及其他使用电学传感风险较大的高危、易燃易爆环境的应用。光纤形状传感是通过光纤感知自身因形状变化产生的差异化响应完成对被测对象形状和空间位置的测量,具有结构简单、易集成、稳定性高等特点。

光纤形状传感按使用的光纤种类可以分为单模光纤合束方案和多芯光纤方案。单模光纤合束是将几根普通单模光纤合束封装,在形状传感器封装和标定方面有一定的复杂度和难度,但得益于其较大的纤芯间距,这类形状传感器具有更高的形状分辨率。多芯光纤形状传感器则利用一根多芯光纤替代单模光纤束,因此这类形状传感器的优势是更紧凑的体积,更佳的传感器一致性,封装和使用更为便捷。

本文综述了多芯光纤形状传感技术的最新研究进展,简短介绍了多芯光纤和多芯光纤扇入扇出器件,详细地介绍多芯光纤形状传感的原理及相关的应用,讨论了多芯光纤形状传感技术面临的挑战和未来展望。

## 2 多芯光纤及其光器件研究

### 2.1 多芯光纤

随着云计算、大数据、物联网、流媒体等应用场景的数据流量高速增长<sup>[6]</sup>,当前光通信系统已经逼近香农极限<sup>[7-8]</sup>。通信系统对传输容量扩增的需求,使多芯光纤得到了关注,进一步推动了多芯光纤及其相关器件生产制造工艺的快速发展<sup>[9]</sup>。多芯光纤可以利用6个信号维度(时间、波长、振幅、相位、偏振和空间)来突破当前通信信道容量限制<sup>[10-12]</sup>。同时,多芯光纤在光纤器件和光纤传感领域还彰显出独特的优越性,能够提高光纤器件集成度,也能为光纤传感提供更大的灵活性,更容易实现空间多维传感<sup>[13]</sup>,因此多芯光纤还被用于研究流体动力学、量子力学等不同物理分支,并在其他领域应用和发展<sup>[14-19]</sup>。

多芯光纤有多种分类方式,常见的分类方式有纤芯数分类、微结构分类、折射率分布方式分类、芯间强弱耦合分类等<sup>[7]</sup>。纤芯数分类有双芯光纤、三芯光纤、四芯光纤、七芯光纤等,几种典型的多芯光纤端面如图1所示;按微结构分类,主要有线性阵列芯光纤、环形阵列芯光纤等<sup>[13]</sup>;按纤芯间耦合方式分类,则可分为弱耦合多芯光纤和强耦合多芯光纤。

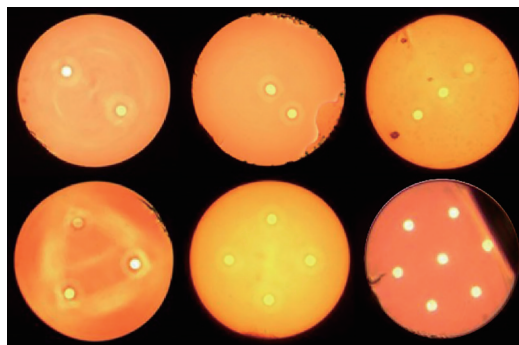


图1 几种典型的多芯光纤端面图<sup>[7]</sup>

Fig. 1 Micrograph of cross section of multi-core optical fibers<sup>[7]</sup>

### 2.2 多芯光纤扇入扇出器件

多芯光纤扇入扇出器是将多芯光纤中各个光通道进行合束、分束的关键器件。目前常用的制作技术包括:空间光学透镜耦合技术、三维(3D)波导耦合技术和光纤束集成耦合技术等。

#### 2.2.1 空间光学透镜耦合

利用空间光学透镜耦合技术制作的多芯光纤扇入扇出器依靠各类光学器件可以灵活实现单个光通道的控制,同时还能实现较低的耦合串扰和损耗<sup>[20]</sup>。但是该技术使用的分立器件较多,因此体积相对较大、在纤芯数较多时,各个光通道器件排布的难度急剧上升,使用和调节较为复杂。采用渐变折射率自聚焦透镜和非球面透镜的单模光纤准直器作为分立光学器件,能部分缩减多芯光纤扇入扇出器件的体积<sup>[21-22]</sup>。

#### 2.2.2 3D波导耦合

基于3D波导耦合技术的多芯光纤扇入扇出器可以采用刻蚀和3D聚合物波导等方式实现。利用超快激光在材料内(如玻璃材料、晶体材料)聚焦点的三维移动,刻写三维结构的光波导,可以实现多芯光纤的水平耦合<sup>[23]</sup>;利用电子束曝光和等离子体刻蚀同时制作光栅耦合器和硅波导,可以实现多芯光纤的倾斜耦合<sup>[24]</sup>,刻蚀技术制作的扇入扇出器具

备高集成度的潜力。3D 聚合物波导则可以采用微量注射法制备<sup>[25]</sup>和紫外(UV)胶旋涂制备<sup>[26]</sup>,制成的多芯光纤扇入扇出器损耗大,可靠性有待进一步验证。

### 2.2.3 腐蚀光纤束组装

光纤束集成耦合技术包括腐蚀光纤束组装法和消逝芯拉锥法。国内外在腐蚀光纤束组装方面开展了大量的工作,通常利用酸腐蚀单模光纤到合适的尺寸,再通过自集成或直接插入的合束方式,与多芯光纤纤芯分布匹配,进一步固定、封胶、研磨制成多芯光纤扇入扇出器件<sup>[27]</sup>。更进一步,通过毛细管辅助,制成可以焊接的腐蚀光纤束型多芯光纤扇入扇出器能有效提升器件稳定性和品质<sup>[28]</sup>。类似地,也可以采用直径与多芯光纤芯间距匹配的细径光纤替代腐蚀光纤组成光纤束,制备光纤扇入扇出器件<sup>[29-30]</sup>。

### 2.2.4 消逝芯拉锥耦合

消逝芯拉锥则是利用三种不同折射率构造的双包层光纤,采用拉锥的方法将原有纤芯缩小到无法约束光波的尺寸,原内包层区域成为新的“纤芯”,原外包层成为新的包层<sup>[31-32]</sup>。基于消逝芯拉锥的原理,可以设计并制备多芯光纤分束器。先根据多芯光纤的纤芯位置、折射率分布等参数匹配过渡的双包层光纤和插入双包层光纤的多孔毛细管;然后利用光纤拉锥技术<sup>[33]</sup>,制备出对称的绝热锥体,使双包层光纤纤芯内传输的模场能绝热过渡到内包层中,和多芯光纤适配;最后在锥腰处切割,与多芯光纤对芯熔接制成多芯光纤扇入扇出器件<sup>[34]</sup>。一种封装完成的四芯光纤扇入扇出器件如图 2(e)所示,其对应的结构示意图如图 2(a)所示,包含 4 根单模光纤尾纤、双包层光纤、四孔石英套管。采用的双包层过渡光纤的折射率分布如图 2(b)所示,对应的截面如图 2(c)所示,图 2(d)的仿真结果展示了两个纤芯在拉锥时,

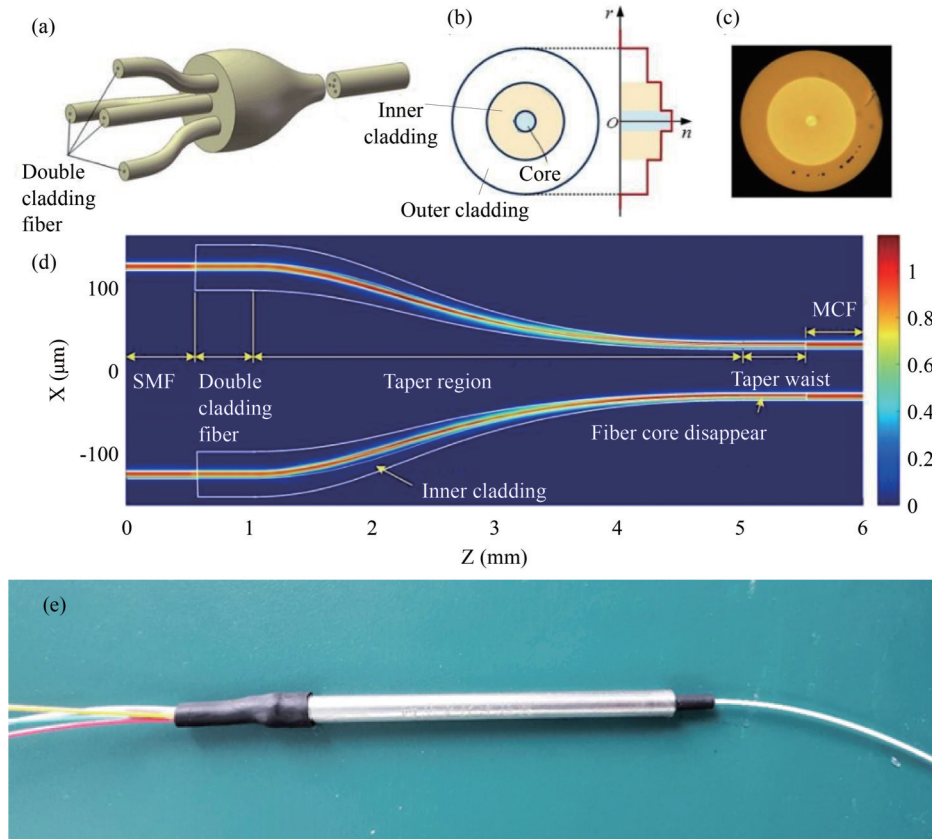


图 2 基于消逝芯拉锥的四芯光纤扇入扇出器件。(a)四芯光纤扇入扇出器件结构示意图;(b)双包层过渡光纤的折射率分布图;(c)双包层过渡光纤的端面图;(d)模场从纤芯中过渡到内包层传输的过程;(e)封装完成的四芯光纤扇入扇出器件

Fig. 2 Four-core fiber fan in/out device based on fading core pulling cone. (a) Schematic diagram of the four-core fiber fan in/out device; (b) refractive index distribution of the double-clad transition fiber; (c) micrograph of cross section of the double-clad transition fiber; (d) transition of the mode field from the core to the inner cladding; (e) packaged four-core fiber fan-in-fan-out device



模场从纤芯过渡到内包层传输的过程。

### 3 多芯光纤形状传感原理

光纤形状传感技术包括形状感知和形状还原两部分,下面就其基本原理和技术进行介绍。

#### 3.1 形状感知原理

光纤形状传感技术主要是利用光纤感知形状变化带来的差异化响应,然后通过算法完成对被测对象形状和空间位置的测量。对于单模光纤,纤芯位于光纤对称轴,也是光纤应变的中性轴,因此无法感知光纤形状变化产生的差异化响应,但可以通过单模光纤合束的方式,将多根单模光纤合束,这样纤芯离开了光纤束应变的中性轴,形状发生变化时即可产生应变响应<sup>[35-40]</sup>,通常这样的光纤束尺寸较大,将单模光纤束集成为一根多芯光纤,能有效缩减传感器体积。

##### 3.1.1 多芯光纤形状感知

对于多芯光纤中的几个纤芯,在光纤形状发生如图 3 所示的弯曲变化时,不在光纤弯曲中性面  $N$  上的纤芯将会产生应变响应,中性面  $N$  内侧的纤芯产生压缩响应,中性面  $N$  外侧的纤芯产生拉伸响应,图 3 中  $M$  表示光纤弯曲方向所在的平面,与中性面  $N$  互相垂直。

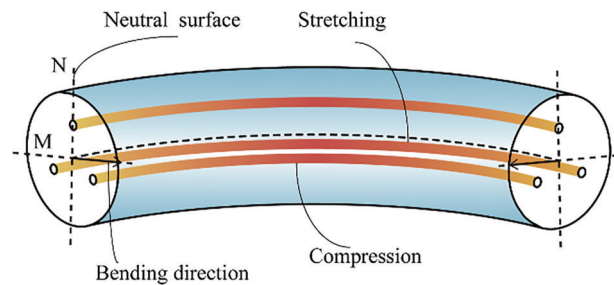


图 3 三芯光纤弯曲示意图

Fig. 3 Schematic diagram of three-core fiber bending

在纯弯曲条件下,对于圆截面弹性梁,轴向应变和曲率之间存在以下关系。

$$\epsilon = \frac{D}{\rho} = D \cdot C, \quad (1)$$

式中: $\epsilon$ 为光纤感测位置的轴向线应变值; $\rho$ 为传感器感测位置的曲率半径; $C$ 为对应的曲率; $D$ 为纤芯到中性面的距离。一种轴对称三角形三芯光纤结构示意图如图 4 所示,由三个以正三角形分布的纤芯

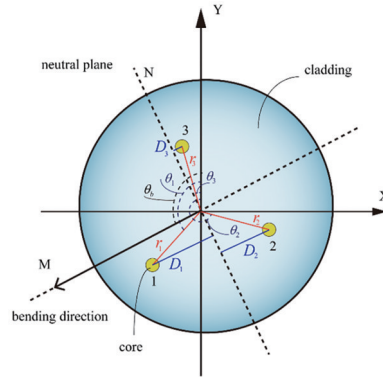


图 4 轴对称三角形三芯光纤结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of axisymmetric triangular three-core fiber structure

组成。当光纤作曲率半径为  $\rho$  的弯曲时,由图中的几何关系可以得到纤芯  $i(i=1, 2, 3)$  到中性面的距离。

$$D_i = r_i \cos(\theta_b - 3\pi/2 - \theta_i), (i=1, 2, 3), \quad (2)$$

式中: $\theta_1, \theta_2$  和  $\theta_3$  为纤芯 1、2、3 相对于  $Y$  轴的方位角,因此存在固定关系;纤芯到光纤中心的距离都为  $r$ ;  $\theta_b$  为光纤弯曲方向与  $Y$  轴的夹角。

在多芯光纤形状传感系统中,通过采集各个纤芯的应变响应值,结合下式即可求解  $\rho, \theta_b$  和  $\theta_i$ ,得到光纤局部的弯曲半径和方向。

$$\begin{cases} \epsilon_1 = \frac{r_1}{\rho} \cos(\theta_b - 3\pi/2 - \theta_1) \\ \epsilon_2 = \frac{r_2}{\rho} \cos(\theta_b - 3\pi/2 - \theta_2) \\ \epsilon_3 = \frac{r_3}{\rho} \cos(\theta_b - 3\pi/2 - \theta_3) \end{cases} \quad (3)$$

##### 3.1.2 螺旋多芯光纤形状感知

在多芯光纤形状传感中,扭转是引起形状还原误差的重要因素<sup>[41]</sup>,其引入的原因有很多,如在光纤封装和操作过程中引入等。普通多芯光纤对扭转的响应并不敏感,因此为了检测扭转,可以对普通多芯光纤进行螺旋增敏<sup>[42]</sup>,图 5 为螺旋多芯光纤传感原理,其节距为  $L_p$ ,螺旋芯到光纤中心距离为  $r$ ,光纤在外加扭转下产生的扭转角为  $\theta_t$ 。螺旋芯的长度由  $L$  变为  $L_\epsilon$ ,因此根据图中的几何关系,可以得到螺旋芯轴向应变  $\epsilon$  与单位节距上的扭转角  $\theta_t$  之间的关系。

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{L_\epsilon - L}{L} = \sqrt{\frac{L_p^2 + r^2(2\pi + \theta_t)^2}{L_p^2 + 4\pi^2 r^2}} - 1 = \sqrt{1 + \frac{4\pi\theta_t + \theta_t^2}{(L_p/r)^2 + 4\pi^2}} - 1. \quad (4)$$

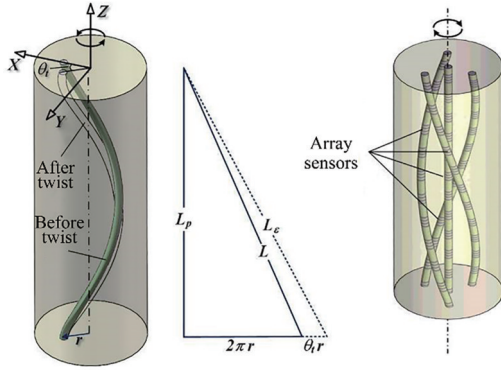


图 5 螺旋多芯光纤传感原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of spiral multi-core fiber sensing principle

### 3.2 形状感知技术

光纤形状感知包括准分布式传感和分布式传

感,准分布式传感主要是使用光纤布拉格光栅 (FBG),分布式传感主要包括基于瑞利散射的分布式传感和基于布里渊散射的分布式传感。

#### 3.2.1 准分布式传感

FBG 是一类不受电磁干扰的完全无源器件,其主要是利用光纤的光敏性,通过一定方法使光纤纤芯的折射率沿轴向发生周期性变化,从而产生永久性的调制<sup>[43-44]</sup>,FBG 对应变和温度敏感<sup>[45]</sup>,在工程中已有大量应用<sup>[46]</sup>。基于 FBG 的准分布式应变传感主要包括三种技术:波分复用、时分复用和空分复用。光栅的中心波长  $\lambda_B$  由下式确定。

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (5)$$

式中:  $\Lambda$  为光栅周期;  $n_{\text{eff}}$  为纤芯模式的有效折射率。根据光弹理论,轴向应变和温度引起的波长变化为

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \left[ 1 - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right] \epsilon + 2n_{\text{eff}}\Lambda \left[ \left( \alpha + \frac{dn_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}} dt} \right) \Delta T \right], \quad (6)$$

式中:  $\epsilon$  为外加应变;  $P_{i,j}$  为光弹性张量的普克尔压电系数;  $\nu$  为泊松比;  $\alpha$  为光纤材料的热膨胀系数;  $\Delta T$  为温度变化量。以上述三芯光纤为例,假定  $K_\epsilon$  为 FBG 的应变灵敏度,  $K_T$  为 FBG 的温度灵敏度,对 (6) 式进行简化,得到:

$$\begin{cases} \Delta\lambda_1 = K_\epsilon \frac{r_1}{\rho} \cos(\theta_b - 3\pi/2 - \theta_1) + K_T \Delta T \\ \Delta\lambda_2 = K_\epsilon \frac{r_2}{\rho} \cos(\theta_b - 3\pi/2 - \theta_2) + K_T \Delta T \\ \Delta\lambda_3 = K_\epsilon \frac{r_3}{\rho} \cos(\theta_b - 3\pi/2 - \theta_3) + K_T \Delta T \end{cases} \quad (7)$$

求解得到弯曲半径  $\rho$ 、弯曲方向  $\theta_b$  和温度  $\Delta T$ <sup>[47]</sup>。在实际应用中,多芯光纤的对称轴上置入一根中间芯,如图 6 所示,中间芯仅能感知到光纤整体

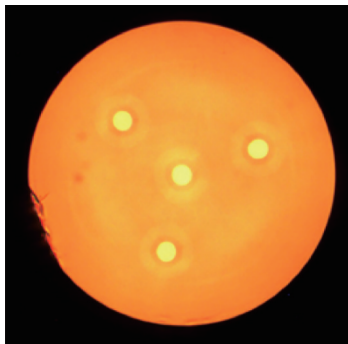


图 6 轴对称三角形四芯光纤端面

Fig. 6 Micrograph of cross section of axisymmetric triangular four-core fiber

的拉伸压缩和温度变化,对光纤的局部弯曲不会产生响应<sup>[48]</sup>,中间芯的引入,能有效地消除环境影响和系统偏差,提高系统测量精确度。

#### 3.2.2 分布式传感

分布式光纤形状传感技术主要是利用散射光,如图 7 所示,拉曼散射仅对温度敏感,因此光纤形状传感技术主要采用对温度和应变敏感的瑞利散射和布里渊散射。瑞利散射只能用于测量相对变化,而布里渊散射则可以测量温度和应变的绝对量<sup>[49]</sup>。利用多种技术组合的混合系统也有望在不同的光纤形状传感场景中应用<sup>[50]</sup>。

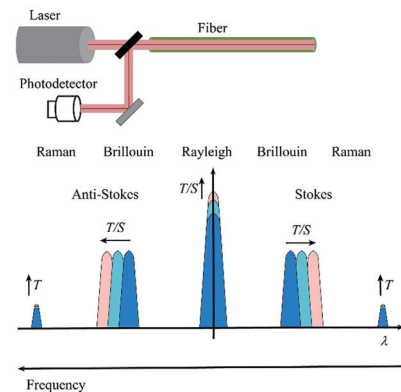


图 7 基于散射光的分布式传感

Fig. 7 Distributed sensing based on scattered light

##### 3.2.2.1 基于瑞利散射的分布式传感

基于瑞利散射的分布式传感技术主要有光时

域反射计 (OTDR) 和光频域反射计 (OFDR)。OTDR 是将激光脉冲发射到光纤中, 再从同一端接收后向瑞利散射光, 测量接收光功率作时间的函数, 最终换算为光纤的长度。OTDR 的速度限制了空间分辨率<sup>[51-53]</sup>。OFDR 则是利用连续激光在一定频域内扫描, 对接收的后向散射光进行傅里叶变换, 将每个点的振幅和相位与频域对应。OFDR 具有空间分辨率高、应变传感精度高等优点, 其传感距离小于 OTDR<sup>[53-54]</sup>。OFDR 有两种类型, 一是利用纤芯固有的瑞利散射, 二是将纤芯在紫外下曝光<sup>[55]</sup>或在纤芯刻写连续弱光栅<sup>[56-57]</sup>以增强瑞利散射。除此之外, 相位敏感型光时域反射计 ( $\Phi$ -OTDR) 还兼具灵敏度高、响应速度快的特点<sup>[58]</sup>。

### 3.2.2.2 基于布里渊散射的分布式传感

基于布里渊散射的分布式应变传感技术主要有布里渊光时域反射计 (BOTDR) 和布里渊光时域分析 (BOTDA)。BOTDR 类似于 OTDR, 但是其空间分辨率较低<sup>[49]</sup>。BOTDA 则是依靠受激布里渊散射得到更好的信噪比, 利用光纤中的布里渊散射光频移量与光纤轴向应变或环境温度之间的线性关系来实现传感<sup>[59]</sup>, 与 OFDR 相比, BOTDA 不需要刻写连续光栅<sup>[49,60]</sup>。在 BOTDA 技术中, 布里渊频

移与温度、应变的关系为

$$\nu_B(\epsilon, T) = \nu_B(0) + C_{11}(\epsilon - 0) + C_{12}(T - T_0), \quad (8)$$

式中:  $\nu_B(\epsilon, T)$  表示应变为  $\epsilon$ 、温度为  $T$  的布里渊频移;  $\nu_B(0)$  表示  $\epsilon = 0$ 、 $T = T_0$  时的布里渊频移;  $C_{11}$  为应变系数;  $C_{12}$  为温度系数。基于含中间芯形状感测方案, 可以有效地简化布里渊频移与应变的关系, 得到

$$\nu_B(\epsilon) = \nu_B(0) + C_{11}(\epsilon - 0). \quad (9)$$

### 3.3 形状还原

光纤感测到的信息通过曲率重建<sup>[61]</sup>、形状重构等步骤, 最终实现形状还原。

#### 3.3.1 曲率重建

Greenaway 等<sup>[62]</sup>在 1998 年提出了一种基于多芯光纤的弯曲传感器, 能够实现弯曲方向和大小的测量。Gander 等<sup>[63]</sup>于 2000 年利用布拉格光栅在多芯光纤中实现了曲率检测。Flockhart 等<sup>[64]</sup>于 2003 年在四角四芯光纤的三个纤芯中写入布拉格光栅, 实现了正交轴上的曲率测量, 如图 8 所示, X 轴和 Y 轴曲率均方根误差分别为  $0.0579 \text{ m}^{-1}$  和  $0.0284 \text{ m}^{-1}$ 。MacPherson 等<sup>[65]</sup>于 2004 年用四芯光纤 FBG 作为应变传感器实现了俯仰和滚转的测量, 滚转和俯仰测量的分辨率分别为  $\pm 2^\circ$  和  $\pm 15^\circ$ 。

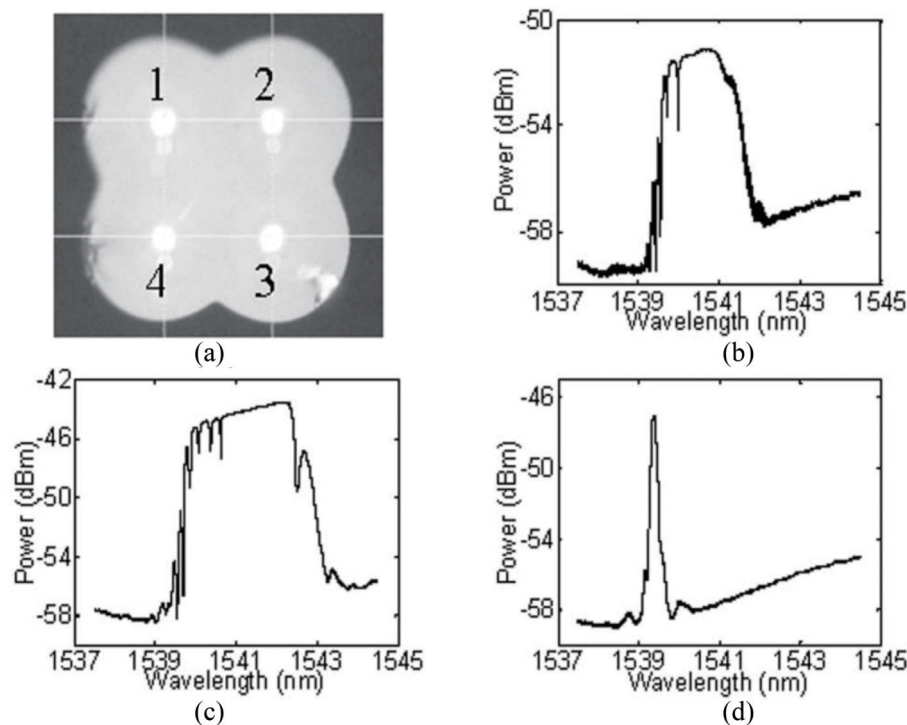


图 8 多芯光纤正交轴曲率测量。(a)多芯光纤的截面;(b)~(d)纤芯 1, 纤芯 2 和纤芯 3 的原始 FBG 反射光谱<sup>[64]</sup>

Fig. 8 Multi-core fiber orthogonal axis curvature measurements. (a) Cleaved face of a multi-core fiber; (b)~(d) unstrained FBG reflection spectra for cores 1, 2, and 3, respectively<sup>[64]</sup>



Barrera 等<sup>[66]</sup>于 2015 年利用波分复用技术开发了两种基于 FBG 传感器的四芯光纤形状传感器,对均匀和非均匀的曲率半径、曲率方向均实现了高精度测量,在其应用曲率范围内标准差低于 1.6%,2018 年,他们还实现了基于七芯光纤长周期光栅对曲率的测量,在 0~1.77 m<sup>-1</sup>的曲率范围内得到了线性响应,最大曲率灵敏度为 -4.85 nm/m<sup>-1</sup><sup>[67]</sup>。Zhao 等<sup>[60]</sup>于 2016 年得到了七芯光纤中布里渊频移和曲率之间的关系,在多个形状测试下,半径误差在 0.15 cm 以下,弯曲角度误差在 10° 以下。Szostkiewicz 等<sup>[68]</sup>于 2019 年利用 Φ-OTDR 在七芯光纤上实现了高灵敏度曲率测量,该系统在 24 m 长的多芯光纤上具有低至 0.3 με 的高应变灵敏度,空间分辨率为 10 cm,在 60 cm 长的光纤上,自由移动的光纤末端可检测位移小至 50 μm。2020 年, Bao 等<sup>[69]</sup>提出一种四芯光纤任意纤芯刻写光栅的方案,通过选择性的在纤芯内刻写光栅可以实现对光纤弯曲和方向的响应,弯曲灵敏度达到 54.3 pm/m<sup>-1</sup>、角度分辨率为 5°。

### 3.3.2 形状重构

光纤形状传感的最终目的是实现形状还原,其关键在于形状重构算法。Miller 等<sup>[70]</sup>在 2004 年通过分布式应变对曲率实现了测量,并利用圆弧段近似的方法对局部形状进行还原,最终实现二维形状的

重构。同年,钱晋武等<sup>[71-72]</sup>则利用 FBG 开发了一种内窥镜传感设备,利用弧段近似实现了形状重构和三维动态显示。

2009 年,朱晓锦等<sup>[73-74]</sup>则将运动坐标系和曲率矢量、密切平面结合,分析了曲率信息插值方法、空间曲线三维拟合方法及其重构算法,实现了形状重构和曲面重构<sup>[74]</sup>。Roesthuis 等<sup>[75]</sup>于 2012 年提出了一种基于 Rayleigh-Ritz 公式的力学模型重构方法,对末端挠度进行了较好的还原,并进一步将其进行改进和优化,利用分段和迭代的方式实现了三维空间的形状重构<sup>[76]</sup>。

以上的形状重构方法在二维形状重构时效果较好,在三维形状重构方面效果还有待提高。Moore 等<sup>[77-78]</sup>于 2012 年提出了一种适用于空间三维形状重构的改进算法,基于微分几何的 Frenet-Serret 方程,将光纤等效为基尔霍夫杆模型,将光纤的应变最终转化为曲率和挠率,利用切向、法向和副法向的关系,将复杂的三维形状用连续参数的方法进行重构,形状还原效果如图 9 所示<sup>[77]</sup>,利用该重构方法实现了对三芯光纤的形状还原<sup>[79]</sup>。基于该方法, Lim 等<sup>[80]</sup>提出了将曲线段等效为螺旋段,并进行了原理验证。Al-Ahmad 等<sup>[81]</sup>于 2020 年在此基础上对重构算法进行了进一步的改进,并进行了实验验证,得到较好的精度和稳定性。

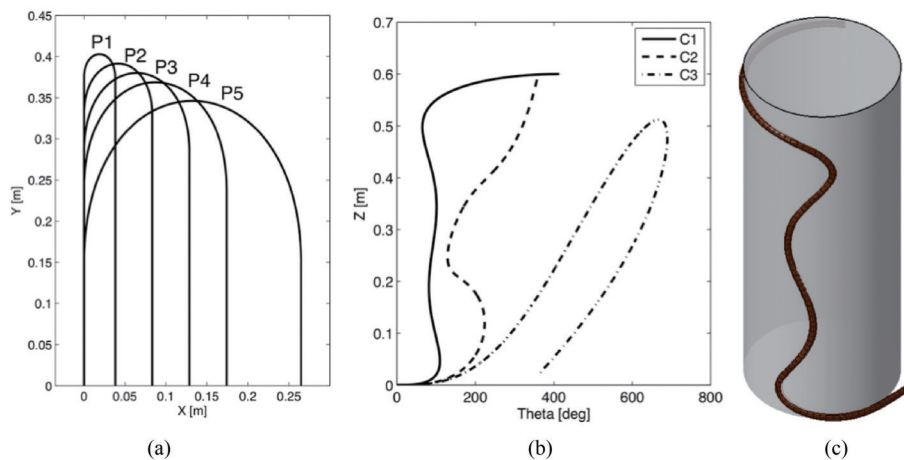


图 9 三芯光纤形状测量示例。(a)曲线 P1~P5 的关系;(b)Z 和  $\theta$  的关系;(c)C1 的三维曲线显示<sup>[77]</sup>  
 Fig. 9 Three-core fiber shape measurement example. (a) Relationship between curves P1~P5; (b) relationship between Z and  $\theta$ ; (c) 3D curve display of C1<sup>[77]</sup>

### 3.4 误差分析

为了得到较好的模型参数估计,可以使用最优问题分析<sup>[81]</sup>。

$$C(\Theta) = \sum_{i=1}^k \{d[C_{s,gr}(s, k) - C_{s,rc}(s, k, \Theta)]\}, \quad (10)$$

式中:  $\Theta$  为模型输入参数的矢量;  $C(\Theta)$  为目标函数;  $C_{s,gr}(s, k)$  为实际真实曲线;  $C_{s,rc}(s, k, \Theta)$  为形状

重构曲线;  $d[C_{s,gr}(s, k) - C_{s,rc}(s, k, \theta)]$  为在两条曲线上两点间的欧氏距离。

多芯光纤形状传感必须考虑形状还原误差大小,目前技术上主要有以下几个方面的影响:

1) 形状传感器的长度带来形状还原误差传播和放大,更长的长度会导致更大的误差<sup>[82-83]</sup>。

2) 传感区间距影响形状传感分辨率,较大的传感区间距需要通过插值的方法补充中间缺失的区域,降低了形状还原的准确度。对于不同的形状,传感区间距可能不同,同时,不同的插值方法也可能引入不同程度的误差<sup>[84]</sup>。

3) 传感区长度的大小影响形状还原的精度。对使用 FBG 的多芯光纤形状传感,较长的 FBG 使得反射峰更强,波长峰值更易检测(仪器本身精度也将影响形状还原误差),传感应变、曲率和形状感知还原的精度显著提高,在局部上实现更好的平均误差<sup>[83]</sup>。

4) 如前文所述,扭转是影响多芯光纤形状传感准确度的重要因素<sup>[85]</sup>。增大多芯光纤芯间距、减小光纤螺旋节距以及增加光纤螺旋周期能有效提高扭转感知的灵敏度,但这些方式会带来更大的体积或者更大的损耗,同时一致性好的螺旋光纤制造难度也较高。Fibercore 公司制造了一种螺旋多芯光纤,并进行了 FBG 刻写测试<sup>[86]</sup>。OFS 实验室实现了螺旋多芯光纤连续光栅的制造,如图 10 所示,利用 OFDR 进行了形状传感验证<sup>[57, 87]</sup>。

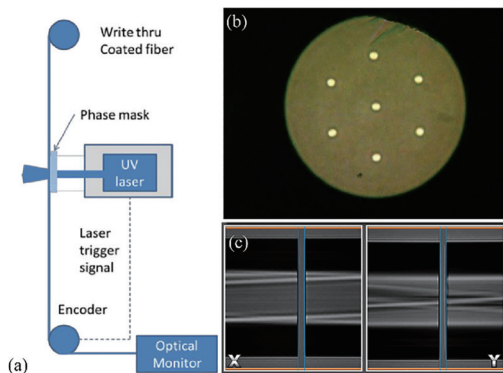


图 10 多芯光纤连续光栅刻写。(a)连续光纤光栅刻写装置;(b)多芯光纤横截面;(c)螺旋芯光纤侧视图<sup>[57]</sup>

Fig. 10 Multi-core fiber continuous grating inscription. (a) Continuous fiber grating fabrication apparatus; (b) cross section of a twisted multi-core fiber; (c) side view of a twisted fiber<sup>[57]</sup>

## 4 应用

近年来,多芯光纤形状传感技术不断发展,有较多领域均对此有较大的兴趣和潜在的需求,尤其是在医疗、工业、航空航天等领域,不同的应用场景对多芯光纤形状传感器的具体要求是有差异的。

### 4.1 医疗

在介入治疗中,对人体内医疗器械的形状和位置实时动态跟踪极其重要<sup>[88-89]</sup>。目前,医疗应用中,更多的还是使用透视的方式,其缺点是对人体伤害大、数据采集速度低等<sup>[90-91]</sup>。多芯光纤形状传感器在众多医疗应用中具有较大的潜力,内窥镜<sup>[71-72, 92]</sup>、血管介入<sup>[93]</sup>和微创手术等,其优点是安全性高、生物相容性好、灵活度高、结构紧凑、重量轻、体积小、易于集成。2019年,Jackle等<sup>[93]</sup>利用多芯光纤开发了一种用于血管介入的形状传感器,利用七芯光纤中的三个纤芯,写入 FBG,对曲率和角度进行测量,然后经过波长漂移量计算、纤芯应变计算、纤芯应变插值、曲率和角度计算、曲率和角度校正,完成了形状重构,利用 380 mm 的传感距离,实现了在血管场景中的形状还原,平均误差为 1.13 mm,最大误差为 2.11 mm。Khan等<sup>[92]</sup>利用多个四芯光纤和 FBG 组(图 11),进行了形状重构,每个四芯光纤都有 6 组 FBG,最终将 16 个通道合并为 4 个通道,实验验证可以实现最大平均误差和最大绝对误差为 0.44 mm 和 1.05 mm 的高精度形状感知。除此之外,多芯光纤形状传感器在医疗机器人领域也有应用<sup>[94-97]</sup>。

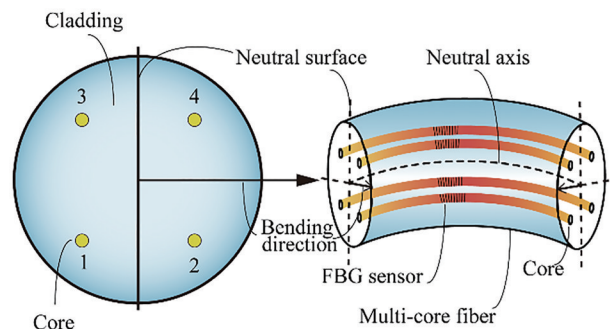


图 11 四芯光纤形状传感器<sup>[92]</sup>

Fig. 11 Four-core fiber shape sensor<sup>[92]</sup>

### 4.2 工业机器人

工业机器人不断趋于智能化,更灵活更高效率的机器人是未来的发展趋势,基于此,多芯光



纤形状传感有着较大的应用潜力<sup>[37,88,96]</sup>。其一是链接机械臂,高精度制造需要机械臂的高精度动静态定位,基于刚体链接的位置估计已经难以满足需求;其二是连续体机器人<sup>[82,95,98-99]</sup>,如图 12 所示,对实时姿态感知有较高的需求。另一方面,在智能可穿戴设备领域中,多芯光纤形状传感技术高度集成的优势将会更好的体现<sup>[100]</sup>。

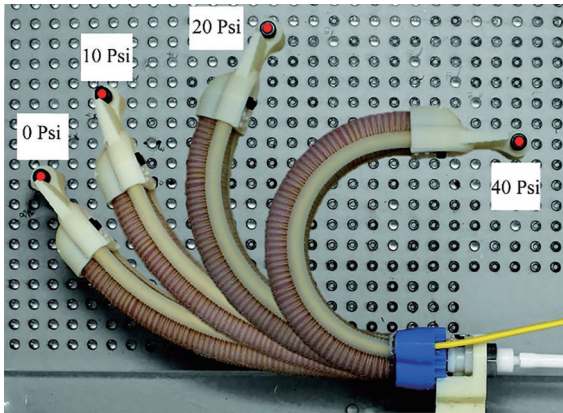


图 12 基于光纤形状传感的软体机器人<sup>[82]</sup>

Fig. 12 Soft robot based on optical fiber shape sensing<sup>[82]</sup>

### 4.3 航空航天

航空航天面临的复杂环境,考验着关键结构安全,在结构处于长时间大应力应变振动的情况下,极有可能威胁航空航天安全,因此,结构监测成为了一大需求<sup>[101-102]</sup>。Klute 等<sup>[54]</sup>于 2006 年将基于三芯光纤的高密度分布式 FBG 形状感知系统应用于 VGC (Variable Geometry Chevron) 研究,对不同飞行状态下的结构进行了监测;Froggatt 等<sup>[103]</sup>于 2011 年提出螺旋四芯光纤 FBG 的三维形变和位移传感模型,2012 年利用 OFDR 技术实现了 20~30 m 的曲率、扭转和三维形状测量,路径均方根误差小于 7.7 cm (长度的 0.4%),最大误差 13.5 cm (长度的 1%)。在对柔性表面测量的实际应用中,该传感器采用了 9.8 m 长的螺旋四芯光纤,其形状感测均方根误差小于 10.9 cm,如图 13 所示<sup>[104]</sup>。

### 4.4 土木工程

地震、滑坡等地质灾害频发,严重威胁人们生命财产安全,因此地质灾害监测预警至关重要,光纤形状传感因其传感距离长、维护率低、实时性强等特点,对这种场景有着较好的适用性<sup>[105-108]</sup>。在建筑、桥梁和隧道等结构监测方面,光纤形状传感同样有着较好的适用性<sup>[109-111]</sup>,如图 14 所示。Barrera 等<sup>[112]</sup>于 2019 年开发了一种

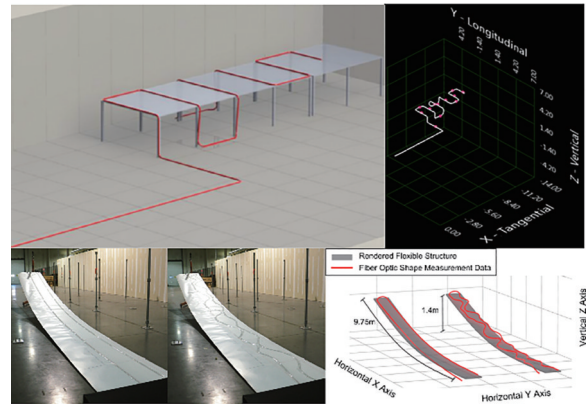


图 13 扭转多芯光纤形状传感实验<sup>[104]</sup>

Fig. 13 Twisted multi-core fiber shape sensing experiment<sup>[104]</sup>

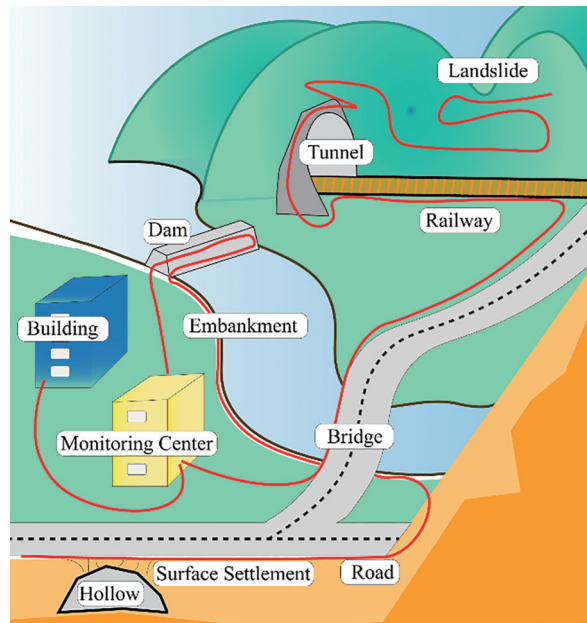


图 14 多芯光纤形状传感在土木工程中的应用

Fig. 14 Application of multi-core fiber shape sensing in civil engineering

七芯光纤形状传感器,在高辐射的环境下进行了测试,验证了多芯光纤形状传感器在高辐射环境下的可靠性,可用于核电站和乏燃料池等结构安全检测。

### 4.5 潜在应用

多芯光纤形状传感技术在矿井通风、矿洞监测、矿山环境监测、油气勘探、油气管线监测等方面有着较大的应用潜力,如矿用机械健康状态监测和实时定位、连续钻探定位等<sup>[50,113-115]</sup>。一种可用于石油和天然气领域的混合分布式声学 and 温度传感系统 (DATS) 如图 15 所示,可以同时实现分布式振动和温度测量,空间分辨率为 5 m,温度分辨率小于 0.5 °C<sup>[113]</sup>。



- multiplexing fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0106003.
- 涂佳静, 李朝晖. 空分复用光纤研究综述[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0106003.
- [12] Puttnam B J, Eriksson T A, Mendinueta J M D, et al. Modulation formats for multi-core fiber transmission[J]. *Optics Express*, 2014, 22(26): 32457-32469.
- [13] Yuan L B, Dai Q, Tian F J, et al. Characteristics and applications of multi-core and array core fiber [C]//2010 Optics Congress of Chinese Optical Society, August 23, 2010, Tianjin, China. Beijing: Chinese Optical Society, 2010: 2515-2521.
- 苑立波, 戴强, 田凤军, 等. 多芯与阵列芯光纤特性及应用[C]//中国光学学会 2010 年光学大会论文集. 天津, 2010: 2515-2521.
- [14] Fatome J, Finot C, Millot G, et al. Observation of optical undular bores in multiple four-wave mixing[J]. *Physical Review X*, 2014, 4(2): 021022.
- [15] Karbasi S, Frazier R J, Koch K W, et al. Image transport through a disordered optical fibre mediated by transverse Anderson localization[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 1-9.
- [16] Miri M A, Heinrich M, El-Ganainy R, et al. Supersymmetric optical structures[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(23): 233902.
- [17] Philbin T G, Kuklewicz C, Robertson S, et al. Fiber-optical analog of the event horizon[J]. *Science*, 2008, 319(5868): 1367-1370.
- [18] Schwartz T, Bartal G, Fishman S, et al. Transport and Anderson localization in disordered two-dimensional photonic lattices[J]. *Nature*, 2007, 446(7131): 52-55.
- [19] Yuan L B. Specialty optical fibers for micro particle manipulation: optical tweezers, hands and gun[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2020, 18(2): 1-6.
- 苑立波. 纤端光操纵: 光镊·光手·光枪[J]. *光学与光电技术*, 2020, 18(2): 1-6.
- [20] Klaus W, Sakaguchi J, Puttnam B J, et al. Free-space coupling optics for multicore fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(21): 1902-1905.
- [21] Tottori Y, Kobayashi T, Watanabe M. Low loss optical connection module for seven-core multicore fiber and seven single-mode fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(21): 1926-1928.
- [22] Lee Y, Tanaka K, Nomoto E, et al. Multi-core fiber technology for optical-access and short-range links [C]//2014 12th International Conference on Optical Internet 2014 (COIN), August 27-29, 2014, Jeju, Korea (South). New York: IEEE Press, 2014: 1-2.
- [23] Thomson R R, Harris R J, Birks T A, et al. Ultrafast laser inscription of a 121-waveguide fan-out for astrophotonics[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(12): 2331-2333.
- [24] Ding Y H, Ye F H, Peucheret C, et al. On-chip grating coupler array on the SOI platform for fan-in/fan-out of multi-core fibers with low insertion loss and crosstalk[C]//2014 the European Conference on Optical Communication (ECOC), September 21-25, Cannes, France. New York: IEEE Press, 2014: 1-3.
- [25] Suganuma D, Ishigure T. Fan-in/out polymer optical waveguide for a multicore fiber fabricated using the Mosquito method[J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1585-1593.
- [26] Watanabe T, Hikita M, Kokubun Y. 19-core fan-in/fan-out waveguide device for dense uncoupled multicore fiber[C]//2013 IEEE Photonics Conference, September 8-12, 2013, Bellevue, WA, USA. New York: IEEE Press, 2013: 303-304.
- [27] Cui J W, Zhu S Q, Feng K P, et al. Fan-out device for multicore fiber coupling application based on capillary bridge self-assembly fabrication method[J]. *Optical Fiber Technology*, 2015, 26: 234-242.
- [28] Yoshida M, Hirooka T, Nakazawa M. Low-loss and reflection-free fused type fan-out device for 7-core fiber based on a bundled structure[J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 18817-18826.
- [29] Watanabe K, Saito T. Compact fan-out for 19-core multicore fiber, with high manufacturability and good optical properties[C]//2015 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), June 28-July 2, 2015, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2015: 1-3.
- [30] Saito T, Watanabe K, Suematsu K, et al. Confirmation of core pitch accuracy of fiber bundle type fan-out for MCF[C]//2014 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, July 14-16, 2014, Montreal, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2014: 168-169.
- [31] Neugroschl D, Kopp V I, Singer J, et al. "Vanishing-core" tapered coupler for interconnect applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7221: 72210G.
- [32] Kopp V I, Park J, Wlodawski M, et al. Chiral fibers: microformed optical waveguides for polarization control, sensing, coupling, amplification, and switching [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(4):



- 605-613.
- [33] Huang J B, Chu D P, Zhang D P, et al. Tensile-strength enhancement of optical fibers after fused biconical-taper processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(20): 2006002.  
黄建滨, 初单萍, 张大鹏, 等. 光纤熔融拉锥后抗拉强度增强研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(20): 2006002.
- [34] Meng L Z, Chen G D, Wang D H, et al. Thermal diffusion technique for in-fiber discrete waveguide manipulation and modification: a tutorial[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020.
- [35] Parent F, Loranger S, Mandal K K, et al. Enhancement of accuracy in shape sensing of surgical needles using optical frequency domain reflectometry in optical fibers[J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, 8(4): 2210-2221.
- [36] 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.
- [37] Abayazid M, Kemp M, Misra S. 3D flexible needle steering in soft-tissue phantoms using fiber Bragg grating sensors[C]//2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 6-10, 2013, Karlsruhe, Germany. New York: IEEE Press, 2013: 5843-5849.
- [38] Shi C Y, Giannarou S, Lee S L, et al. Simultaneous catheter and environment modeling for trans-catheter aortic valve implantation[C]//2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, September 14-18, 2014, Chicago, IL, USA. New York: IEEE Press, 2014: 2024-2029.
- [39] Ryu S C, Dupont P E. FBG-based shape sensing tubes for continuum robots[C]//2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 31-June 7, 2014, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2014: 3531-3537.
- [40] Xu R, Yurkewich A, Patel R V. Shape sensing for torsionally compliant concentric-tube robots[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9702: 97020V.
- [41] Henken K R, Dankelman J, van den Dobbelsteen J J, et al. Error analysis of FBG-based shape sensors for medical needle tracking[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(5): 1523-1531.
- [42] Askins C G, Miller G A, Friebele E J. Bend and twist sensing in a multiple-core optical fiber[C]//OFC/NFOEC 2008 - 2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, February 24-28, 2008, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2008: 1-3.
- [43] Lindley E, Min S S, Leon-Saval S, et al. Demonstration of uniform multicore fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2014, 22(25): 31575-31581.
- [44] Askins C G, Taunay T F, Miller G A, et al. Inscription of fiber Bragg gratings in multicore fiber [C]//Nonlinear Photonics 2007, September 2-6, 2007, Québec City, Canada. Washington, D. C.: OSA, 2007: JWA39.
- [45] Campanella C E, Cuccovillo A, Campanella C, et al. Fibre Bragg grating based strain sensors: review of technology and applications[J]. *Sensors*, 2018, 18(9): 3115.
- [46] Presti D L, Massaroni C, Leitão C S J, et al. Fiber Bragg gratings for medical applications and future challenges: a review[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 156863-156888.
- [47] Araújo F M, Ferreira L A, Santos J L. Simultaneous determination of curvature, plane of curvature, and temperature by use of a miniaturized sensing head based on fiber Bragg gratings[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(13): 2401-2407.
- [48] Liu Y, Zhou A, Xia Q, et al. Quasi-distributed directional bending sensor based on fiber Bragg gratings array in triangle-four core fiber[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(22): 10728-10735.
- [49] Masoudi A, Newson T P. Contributed review: distributed optical fibre dynamic strain sensing[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(1): 011501.
- [50] Zhao Z Y, Dang Y L, Tang M, et al. Enabling simultaneous DAS and DTS through space-division multiplexing based on multicore fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(24): 5707-5713.
- [51] Bolognini G, Hartog A. Raman-based fibre sensors: trends and applications[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, 19(6): 678-688.
- [52] Ding Z Y, Wang C H, Liu K, et al. Distributed optical fiber sensors based on optical frequency domain reflectometry: a review[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2018, 18(4): E1072.
- [53] Bao X Y, Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. *Sensors*, 2012, 12(7): 8601-8639.
- [54] Klute S, Duncan R, Fielder R, et al. Fiber-optic shape sensing and distributed strain measurements on

- a morphing chevron[C]//44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, January 9-12, 2006, Reno, Nevada. Virginia: AIAA, 2006: 624.
- [55] Loranger S, Gagné M, Lambin-Iezzi V, et al. Rayleigh scatter based order of magnitude increase in distributed temperature and strain sensing by simple UV exposure of optical fibre[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 11177.
- [56] Westbrook P S, Kremp T, Feder K S, et al. Performance characteristics of continuously grated multicore sensor fiber[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10323: 103236I.
- [57] Westbrook P S, Feder K S, Kremp T, et al. Integrated optical fiber shape sensor modules based on twisted multicore fiber grating arrays[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8938: 89380H.
- [58] Zhang X P, Ding Z W, Hong R, et al. Phase sensitive optical time-domain reflective distributed optical fiber sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106004.  
张旭苹, 丁哲文, 洪瑞, 等. 相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106004.
- [59] Thévenaz L. Brillouin distributed time-domain sensing in optical fibers: state of the art and perspectives[J]. Frontiers of Optoelectronics in China, 2010, 3: 13-21.
- [60] Zhao Z Y, Soto M A, Tang M, et al. Distributed shape sensing using Brillouin scattering in multi-core fibers[J]. Optics Express, 2016, 24(22): 25211-25223.
- [61] Villatoro J, van Newkirk A, Antonio-Lopez E, et al. Ultrasensitive vector bending sensor based on multicore optical fiber[J]. Optics Letters, 2016, 41(4): 832-835.
- [62] Greenaway A H, Burnett J G, Harvey A R, et al. Optical fiber bend sensor: US6389187[P]. 1998-12-30.
- [63] Gander M J, MacPherson W N, McBride R, et al. Bend measurement using Bragg gratings in multicore fibre[J]. Electronics Letters, 2000, 36(2): 120-121.
- [64] Flockhart G M, MacPherson W N, Barton J S, et al. Two-axis bend measurement with Bragg gratings in multicore optical fiber[J]. Optics Letters, 2003, 28(6): 387-389.
- [65] MacPherson W N, Flockhart G M H, Maier R R J, et al. Pitch and roll sensing using fibre Bragg gratings in multicore fibre[J]. Measurement Science and Technology, 2004, 15(8): 1642-1646.
- [66] Barrera D, Gasulla I, Sales S. Multipoint two-dimensional curvature optical fiber sensor based on a nontwisted homogeneous four-core fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(12): 2445-2450.
- [67] Barrera D, Madrigal J, Sales S. Long period gratings in multicore optical fibers for directional curvature sensor implementation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(4): 1063-1068.
- [68] Szostkiewicz Ł, Soto M A, Yang Z S, et al. High-resolution distributed shape sensing using phase-sensitive optical time-domain reflectometry and multicore fibers[J]. Optics Express, 2019, 27(15): 20763-20773.
- [69] Bao W J, Sahoo N, Sun Z Y, et al. Selective fiber Bragg grating inscription in four-core fiber for two-dimension vector bending sensing[J]. Optics Express, 2020, 28(18): 26461-26469.
- [70] Miller G A, Askins C G, Friebele E J. Shape sensing using distributed fiber optic strain measurements[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5502: 528-531.
- [71] Zhang L W, Qian J W, Shen L Y, et al. FBG sensor devices for spatial shape detection of intelligent colonoscope[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04.2004, April 26-May 1, 2004, New Orleans, LA, USA. New York: IEEE Press, 2004: 834-840.
- [72] Qian J W, Zheng Q H, Zhang L W, et al. Deformation sensing and incremental shape reconstruction for intelligent colonoscope[J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(5): 518-524.  
钱晋武, 郑庆华, 张伦伟, 等. 渐进式内窥镜形状的感知和重建[J]. 光学精密工程, 2004, 12(5): 518-524.
- [73] Zhu X J, Lu M Y, Zhao X Y, et al. 3D-reconstruction algorithm and visualization analysis for space manipulator vibration shape[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(15): 4706-4709, 4713.  
朱晓锦, 陆美玉, 赵晓瑜, 等. 太空机械臂振动形态三维重构算法及可视化分析[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(15): 4706-4709, 4713.
- [74] Fan H C, Zhang Z, Zhu X J. Application of FBG in flexible surface test[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2009, 26(3): 40-43.  
樊红朝, 张震, 朱晓锦. 柔性曲面变形检测的FBG方法[J]. 机电工程, 2009, 26(3): 40-43.

- [75] Roesthuis R J, Abayazid M, Misra S. Mechanics-based model for predicting in-plane needle deflection with multiple bends[C]//2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob), June 24-27, 2012, Rome, Italy. New York: IEEE Press, 2012: 69-74.
- [76] 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.
- [77] Moore J P, Rogge M D. Shape sensing using multi-core fiber optic cable and parametric curve solutions [J]. Optics Express, 2012, 20(3): 2967-2973.
- [78] Rogge M D, Moore J P. Shape sensing using a multi-core optical fiber having an arbitrary initial shape in the presence of extrinsic forces: US8746076B2[P]. 2014-06-10.
- [79] Moore J P. Shape sensing using multi-core fiber[C]//2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 22-26, 2015, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 1-3.
- [80] Lim S, Han S. Shape estimation of a bent and twisted cylinder using strain from a sensor array in triple helices[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(9): 095003.
- [81] Al-Ahmad O, Ourak M, van Roosbroeck J, et al. Improved FBG-based shape sensing methods for vascular catheterization treatment[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(3): 4687-4694.
- [82] Galloway K C, Chen Y, Templeton E, et al. Fiber optic shape sensing for soft robotics[J]. Soft Robotics, 2019, 6(5): 671-684.
- [83] Floris I, Madrigal J, Sales S, et al. Experimental study of the influence of FBG length on optical shape sensor performance[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 126: 105878.
- [84] Jäckle S, Strehlow J, Heldmann S. Shape sensing with fiber Bragg grating sensors[M]//Handels H, Deserno T M, Maier A, et al. Bildverarbeitung für die medizin 2019. Informatik aktuell. Wiesbaden: Springer, 2019: 258-263.
- [85] Floris I, Madrigal J, Sales S, et al. Twisting measurement and compensation of optical shape sensor based on spun multicore fiber[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 140: 106700.
- [86] Cooper L J, Webb A S, Gillooly A, et al. Design and performance of multicore fiber optimized towards communications and sensing applications[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9359: 93590H.
- [87] Westbrook P S, Kremp T, Feder K S, et al. Continuous multicore optical fiber grating arrays for distributed sensing applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(6): 1248-1252.
- [88] 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 Biomedical Engineering, 2017, 64(8): 1665-1678.
- [89] Deng X, Shen L, Ge J B. Development status of interventional therapy for coronary heart disease in China: interventional therapy devices[J]. Chinese Journal of the Frontiers of Medical Science (Electronic Version), 2021, 13(3): 11-15.  
邓欣, 沈雳, 葛均波. 中国冠心病介入治疗发展现状: 介入治疗器械[J]. 中国医学前沿杂志(电子版), 2021, 13(3): 11-15.
- [90] Merloz P, Troccaz J, Vouillat H, et al. Fluoroscopy-based navigation system in spine surgery [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part H, Journal of Engineering in Medicine, 2007, 221(7): 813-820.
- [91] Mahesh M. Fluoroscopy: patient radiation exposure issues[J]. RadioGraphics, 2001, 21(4): 1033-1045.
- [92] Khan F, Denasi A, Barrera D, et al. Multi-core optical fibers with Bragg gratings as shape sensor for flexible medical instruments[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(14): 5878-5884.
- [93] Jäckle S, Eixmann T, Schulz-Hildebrandt H, et al. Fiber optical shape sensing of flexible instruments for endovascular navigation[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2019, 14(12): 2137-2145.
- [94] Prisco G. Fiber optic shape sensor: US7720322B2 [P]. 2010-05-18.
- [95] Burgner-Kahrs J, Rucker D C, Choset H. Continuum robots for medical applications: a survey [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2015, 31(6): 1261-1280.
- [96] Wang C Y, Xie G N, Zhao D N, et al. Development of medical surgical robot[J]. Tool Engineering, 2016, 50(7): 3-12.  
王成勇, 谢国能, 赵丹娜, 等. 医疗手术机器人发展概况[J]. 工具技术, 2016, 50(7): 3-12.
- [97] Zhao H L, Xie X L, Feng Z Q, et al. Review of robotic system for vascular interventional surgery[J].



- China Medical Devices, 2020, 35(12): 11-16.
- 赵含霖, 谢晓亮, 奉振球, 等. 血管介入手术机器人系统综述[J]. 中国医疗设备, 2020, 35(12): 11-16.
- [98] Wang C. 3D shapes detecting method of soft manipulator based on fiber Bragg grating sensor[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2015, 42(10): 1130-1133.
- 王超. 基于光纤光栅传感器的软体机械臂三维形状检测方法[J]. 化工自动化及仪表, 2015, 42(10): 1130-1133.
- [99] Zhu H W, He Y L, Sun G K, et al. State measurement and sensing characteristics analysis of soft manipulator based on helical optical fiber[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(11): 20200276.
- 祝航威, 何彦霖, 孙广开, 等. 螺旋型光纤传感软体操作臂状态测量及特性分析[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(11): 20200276.
- [100] Jang M, Kim J S, Kang K, et al. Towards finger motion capture system using FBG sensors[C]//2018 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), July 18-21, 2018, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2018: 3734-3737.
- [101] Ma Z, Chen X Y. Fiber Bragg gratings sensors for aircraft wing shape measurement: recent applications and technical analysis[J]. Sensors, 2018, 19(1): 55.
- [102] Arritt B, Murphey T, Dumm H P, et al. Demonstration of the use of fiber-optics, with integrated fiber-Bragg gratings, for shape determination of large deployable structures[C]//48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, April 23-26, 2007, Honolulu, Hawaii. Virginia: AIAA, 2007.
- [103] Froggatt M E, Klein J W, Gifford D K, et al. Optical position and/or shape sensing: US8773650B2 [P]. 2011-12-05.
- [104] Lally E M, Reaves M, Horrell E, et al. Fiber optic shape sensing for monitoring of flexible structures[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8345: 83452Y.
- [105] Zhu H H, Shi B, Zhang C C. FBG-based monitoring of geohazards: current status and trends[J]. Sensors, 2017, 17(3): 452.
- [106] Hong C Y, Zhang Y F, Li G W, et al. Recent progress of using Brillouin distributed fiber optic sensors for geotechnical health monitoring[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 258: 131-145.
- [107] Wu H, Guo Y X, Xiong L, et al. Optical fiber-based sensing, measuring, and implementation methods for slope deformation monitoring: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(8): 2786-2800.
- [108] Zheng Y, Zhu Z W, Xiao W, et al. Review of fiber optic sensors in geotechnical health monitoring[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 54: 102127.
- [109] Ye X W, Su Y H, Han J P. Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology: a comprehensive review[J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014: 652329.
- [110] Kissinger T, Chehura E, Staines S E, et al. Dynamic fiber-optic shape sensing using fiber segment interferometry[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 36(4): 917-925.
- [111] Wymore M L, van Dam J E, Ceylan H, et al. A survey of health monitoring systems for wind turbines [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 52: 976-990.
- [112] Barrera D, Madrigal J, Delepine-Lesoille S, et al. Multicore optical fiber shape sensors suitable for use under gamma radiation[J]. Optics Express, 2019, 27(20): 29026-29033.
- [113] Muanenda Y, Oton C J, Faralli S, et al. Hybrid distributed acoustic and temperature sensor using a commercial off-the-shelf DFB laser and direct detection[J]. Optics Letters, 2016, 41(3): 587-590.
- [114] Sun Y K, Liu J Q, Xue Z Q, et al. A critical review of distributed fiber optic sensing for real-time monitoring geologic CO<sub>2</sub> sequestration[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 88: 103751.
- [115] Samavati A, Velashjerdi M, Ismail A F, et al. Continuous monitoring of crude oil movement in an electromagnetic-assisted enhanced oil recovery process using a modified fiber Bragg grating sensor [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 318: 112428.