先进光纤传感技术专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022073002

光纤形态传感器研究进展

杨 洋[1]，孔令宇[1]，蔡伟康[1]，赵德龙[1]，陈宇涛[1]，宋章启[1,2*]

（1. 南方科技大学 创新创业学院，广东 深圳 518055；2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)，广州 511458）

摘 要： 光纤形态传感技术是解决柔性体形态测量、光电缆实时形态跟踪、医疗介入针轨迹实时跟踪等3D形态恢复问题的创新型技术方案。光纤形态传感技术以光纤作为敏感元件，传感器具有结构简单、易于嵌入安装、测量不需要视觉接触、耐腐蚀，以及抗电磁干扰等优点，适用于水下、地下等复杂环境中的大尺度结构形态测量。近年来，光纤形态传感器受到了越来越多的关注，文章综述了光纤形态传感技术的最新研究进展，以一维曲率传感器、全向型曲率传感器和空间形态传感器为线索，介绍了各阶段传感器的研究现状以及面临的挑战。

关键词： 光纤；形态传感；曲率；光栅；多芯光纤

中图分类号： TN253；TP212.14 **文章编号：** 1001－5868(2022)04－0642－13

Research Progress of Fiber Optic Shape Sensor

YANG Yang[1], KONG Lingyu[1], ZHAO Delong[1], CHEN Yutao[1], SONG Zhangqi[1,2]

(1. School of Innovation and Entrepreneurship, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 150001, CHN;
2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, CHN)

Abstract: Optical fiber shape sensing technology is an innovative technological solution for 3D morphological recovery such as flexible body morphological measurement, real-time morphological tracking of optical cables, and real-time tracking of medical interventional needle trajectories, and so on. Optical fiber shape sensor taking optical fiber as the sensing components. The sensor has many advantages such as simple structure, easy embedding and installation, measurement without visual contact, corrosion resistance, and anti-electromagnetic interference, etc. It is suitable for large-scale structure morphology measurement in complex environments such as underwater and underground. In recent years, fiber optic shape sensors have received increasing attention. In this paper, the latest research progress of optical fiber shape sensing technology was reviewed. Taking one demension optical fiber curvature sensor, omnidirectional optical curvature fiber sensor and spatial shape sensor as clues, the current research status of the sensors at each stage and the challenges faced by them were introduced.

Key words: optical fiber; shape sensing; curvature; optical grating; multi-core fiber

0 引言

结构的形态检测在运动感知、机翼形变测量、微创手术导引、机器人运动控制、自然灾害监测等领域有着广阔的应用前景。传统的形态传感技术采用的传感器主要有应变传感器[1-2]、加速度计[3-5]、光电传感器[6-7]、倾斜传感器[8-11]、摄像系统[12-13]、RA-二极管检测[14-16]，以及激光扫描仪[17]等。以上传感器要么结构复杂、体积过大而不适应与被测物体结合，要么只能从外部对结构物进行测量，不适用于复杂环境下的应用。

收稿日期：2022－07－30.

基金项目：深圳市科技计划基础研究项目(JCYJ20190809154209372)；南方海洋科学与工程广东省实验室（广州）人才团队引进重大专项项目(GML2019ZD0210).

* **通信作者：**宋章启 **E-mail：** songzq@sustech.edu.cn

光纤形态传感器利用光纤的小体积和高灵敏度优点，可以直接附着在待测物体表面或者内部，通过光纤将信号引出到外部解调系统，解算得到被测物体的曲率信息，通过恢复算法实现形状检测的目的，广泛用于管道横向应力分布测量[18]、微创手术引导针[19-20]、机械手臂[21]、机翼形变检测[22]、风帆形状测量[23]、脐带缆动态响应特性监测[24]等。

光纤形态测量大体可以分为基于单个传感器的一维曲率测量、多个传感器组合的单点全向曲率测量和基于全向曲率传感器阵列的空间形态恢复三个过程。本文以此为线索，对基本光纤曲率传感器的几种类型、全向曲率传感器的构成方式，以及基于全向曲率传感器阵列的形态恢复算法的研究现状进行了梳理总结，分析了各种传感方案的优缺点，讨论了空间形态恢复算法的发展方向。

1　光纤曲率传感器

曲率传感器是形态传感的基础器件，通常只能测量一个纬度上的弯曲情况，故也称为 1D 曲率传感器。光纤曲率传感器有多种分类方式，最典型的是按照传感器内部结构分类，可分为缺陷型、拼接型、腔体型、拉锥型、光栅型；也可按照传感时调制的光纤参量来分为：强度型、相位型和波长型。如缺陷型光纤曲率传感器通常为强度调制型，而光栅型光纤曲率传感器则是典型的波长调制型，其他几种结构的光纤曲率传感器既有相位型也有波长型。

1.1　缺陷型

缺陷型光纤曲率传感器的思想来源于光纤的弯曲损耗。但是一般光纤对弯曲不灵敏，因此需要对光纤进行增敏。缺陷型光纤曲率传感器就是在传感区通过人为添加缺陷的方法来提高在弯曲情况下的光传输损耗，从而实现对弯曲的敏感。该类传感器属于强度型光纤传感器。2010 年，Fu 等[25]在塑料光纤一侧包层上刻出锯齿状缺口，缺口底部进入纤芯，产生附加传输损失。光纤在弯曲情况下引起光场分布变化从而调制传输损耗的大小，实现增敏。实验证明该传感器对曲率的响应呈线性，可区分正负弯曲方向。通过调整锯齿深度和齿数可以优化传感器的灵敏度[26]，其结构如图 1 所示。此外，许多研究者对其应用领域进行了深入研究。Markovic 等[27]将两个锯齿状缺陷型光纤曲率传感器平行粘附于 1 m 长的 ABS 杆表面搭建了简支梁测试模型进行曲率测试。Dragan 等[28]将直径为 1.5 mm 的锯齿状缺陷光纤曲率传感器粘附于织物上制成了穿戴式人体关节运动监测系统，通过测量传感器弯曲曲率来计算膝盖弯曲角度。

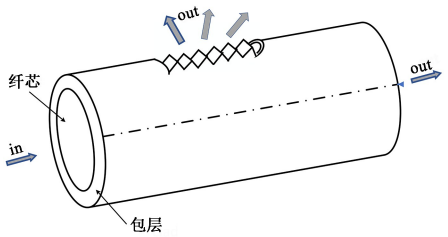


图 1　锯齿状光纤曲率传感器结构示意图

针对锯齿状缺陷结构的加工难度大的问题，Arnaldo 等[29]提出采用抛磨的方式在塑料光纤一侧制造缺陷型敏感区，实现了高精度的曲率传感。抛磨型光纤曲率传感器结构示意图如图 2 所示。该方法还适用于普通熔融石英光纤。2020 年，Yang 等[30]采用抛磨的方式在单模光纤表面打造敏感区，制成了抛磨型光纤曲率传感器。该传感器的曲率响应呈线性，曲率分辨率可达 9.95×10^{-5} m^{-1}，解决了塑料光纤损耗大、基础器件缺乏，不利于构成系统的问题。

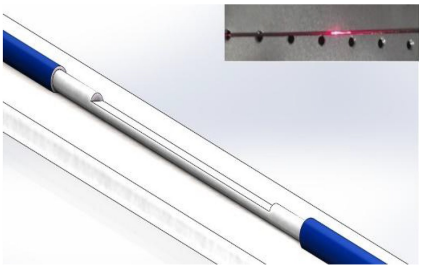


图 2　抛磨型光纤曲率传感器[29]

缺陷型光纤曲率传感器具有结构简单、灵敏度高和解调系统成本低的优点，但由于缺陷增敏方式对光纤结构造成了破坏，降低了光纤的机械性能，长期可靠性得不到保证。

1.2　拼接型

拼接型光纤曲率传感器指将不同类型光纤分段熔接在一起，在弯曲情况下会导致不同模式的耦合损耗或者传输路径的变化，最终导致传输光的功率或光谱特性发生改变，以达到增敏效果。其种类较多，按照拼接方法可分为三层拼接（三明治结构）、错位拼接、多层拼接等。

1.2.1　三层拼接型

三层拼接型光纤曲率传感器指在两根同类型光

纤间熔接其他类型光纤的传感器结构，常被形象地称为三明治结构。该类传感器大多采用波长型调制方法，可通过测量光谱功率和光谱平移来计算曲率[31]。Ma 等[32]采用锥形熔接的方式在两单模光纤内拼接无芯多模光纤制成曲率传感器，并利用波长解调方法解调，其结构如图 3 所示。该传感器在 0～2 600 με 内，灵敏度达－2.06 pm/με。当曲率大于 0.4 m^{-1} 时，光强度和应变呈线性关系。Rodríguez 等[33]采用同样的结构在 0～0.84 m^{-1} 曲率范围内实现了 0.17 m^{-1} 的曲率分辨率。Fu 等[34]将无芯多模光纤替换成三包层特种光纤，制成拼接型光纤曲率传感器，并利用简支梁结构在 0～0.94 m^{-1} 曲率范围内研究了特种光纤长度对曲率响应灵敏度的影响。结果表明，通过改变三明治结构的中间层长度可以改变曲率响应灵敏度。由于光谱偏移同时受曲率和温度两个因素的影响，采用波长解调的拼接型光纤曲率传感器需要进行温度解调，三层拼接型光纤曲率传感器可利用两个损耗带波长对温度响应相近，而对曲率响应不同的特性实现对曲率和温度的同步测量[35]。Gong 等[36]采用单模-光子晶体光纤-单模的结构制成的拼接型光纤曲率传感器在 0～2.14 m^{-1} 曲率范围内实现了 4.451 nm/m^{-1} 的曲率响应灵敏度，且其曲率分辨率可达 4.4×10^{-3} m^{-1}，温度灵敏度仅为 7.78 pm/℃。Luis 等[37]采用空芯毛细管与单模光纤拼接成三层结构，在 0～2.68 m^{-1} 曲率范围内其曲率响应灵敏度为－5.62 dB/m^{-1}，温度灵敏度为 0.038 dB/℃。

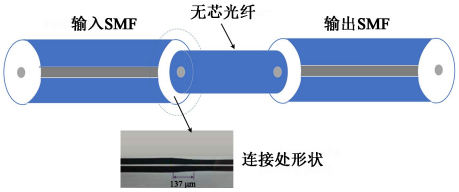


图 3 SMF-MMF-SMF 三明治结构示意图[32]

此外，拼接型光纤曲率传感器还可采用干涉型调制方法[38-39]。Su 等[40]将 2 cm 长的环芯光纤拼接在两段锥度单模光纤间，形成马赫-曾德尔干涉仪结构，如图 4，制成轴向应变不敏感的光纤温度补偿曲率传感器。传感器在 1.316～2.372 m^{-1} 曲率范围内的曲率响应灵敏度为－3.504 nm/m^{-1}，在 20～60 ℃范围内的最大温度响应灵敏度达 59.42 pm/℃。

Gong 等[41]将 36 cm 空芯光子晶体光纤（HC-PCF）的两端拼接到 3 dB 单模光纤耦合器的两个臂上，组成 Sagnac 干涉仪，如图 5 所示。对不同曲率下 Sagnac 干涉仪的输出光谱进行了测量和分析。结果显示，该传感器在 0～9.9 m^{-1} 的曲率范围内实现了 0.232 nm/m^{-1} 的灵敏度，而温度灵敏度仅为 3.7 pm/℃。

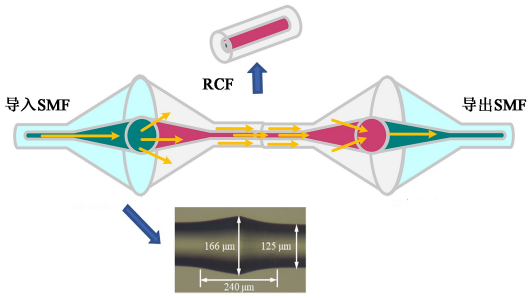


图 4 双锥形结构示意图

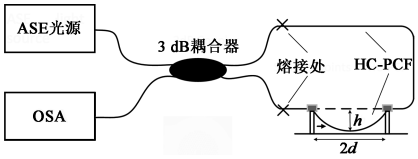
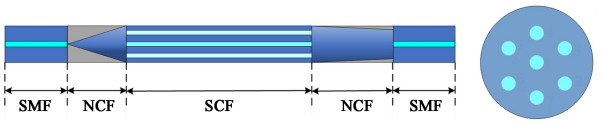


图 5 拼接式干涉仪结构

1.2.2 多层拼接型

三层拼接型光纤曲率传感器的测量范围适用于微弯测量，满足大多数曲率传感需求，但是曲率响应灵敏度仍然不够高。为了提高传感器的曲率响应灵敏度，研究者们将更多种光纤拼接到一起制成多层拼接型光纤曲率传感器，如以三芯单模光纤为核心依次拼接多模光纤和单模光纤[42]制成五层拼接结构的光纤曲率传感器，在 2.79～3.24 m^{-1} 内曲率响应灵敏度可达－28.29 nm/m^{-1}；以空芯光纤为核心，在其两端依次拼接多模光纤和单模光纤制成的光纤曲率传感器[43]在 1.84～2.94 m^{-1} 内，灵敏度可达－17.28±2.30 dB/m^{-1}。多层拼接型光纤曲率传感器由于耦合模式更复杂，多采用波长型解调方式进行解调。Liu 等[44]以七芯光纤为核心，在两端逐次拼接无芯光纤和单模光纤，制成五层结构光纤曲率传感器，其结构如图 6 所示。传感器在 50～100 ℃温度范围内的温度灵敏度为 100.1 pm/℃，在 0.82～1.226 m^{-1} 曲率范围内的曲率响应灵敏达 10.22 dB/m^{-1}。Xiao 等[45]将环芯光纤两端逐次拼接无芯光纤和单模光纤，获得了一种基于马赫-曾德干涉仪和微波光子滤光器的高分辨率曲率传感器。当曲率改变时，因弹光效应引起的干涉光谱变化会转化为微波光子滤波器的频移。文章研究了干扰干涉频谱的可见性因素，对光纤内马赫-曾德尔干涉仪的复用解调进行初步探索。该传感器的曲率灵敏度

达－147.634 MHz/m^{-1}，曲率分辨率高达 6.774×10^{-6} m^{-1}。



（a）　拼接结构　　（b）　七芯光纤端面

图 6　五层拼接结构示意图

1.2.3　错位拼接

由于光纤的对称结构导致上述拼接型光纤曲率传感器无法区分弯曲方向，因此研究者们在设计拼接型光纤曲率传感器时巧妙地加入错位熔接工艺，利用弯曲情况下产生不同的光程差，通过相干解调实现曲率传感的同时区分正负弯曲方向。该方法具有灵敏度高的优势，但是温度灵敏度高、只能解调动态变化，不能测量绝对值。错位熔接的拼接型光纤曲率传感器常采用干涉型解调方法。Ding 等[46]将三芯光纤与单模光纤错位熔接形成马赫-曾德尔干涉仪结构，如图 7 所示。该传感器在 0～1 m^{-1} 的曲率范围内可分辨 0.12 m^{-1} 的弯曲曲率并区分正负弯曲方向。Xu 等[47]采用四芯光纤与单模光纤横向偏移熔接形成错位结构，在 0.042～0.163 m^{-1} 的曲率范围内，其最大曲率灵敏度可以达到－18.75 nm/m^{-1}，并且可区分弯曲方向。

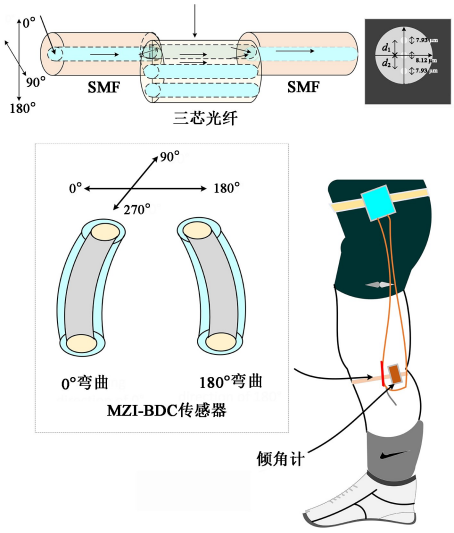


图 7　三层错位熔接模型及膝关节弯曲测量装置

Zhang 等[48]将单模光纤、三芯光纤、多模光纤和单模光纤逐段熔接形成四层熔接结构制成光纤曲率传感器，其中仅单模光纤和三芯光纤错位熔接，如图 8 所示。传感器采用干涉型解调方法。文中提出了对偶微分补偿测量方法，利用不同纤芯在弯曲条件下的光程差形成相干，通过测量相干相消波长偏移量获得曲率大小。传感器在 3.5～3.75 m^{-1} 内实现了－17.67 nm/m^{-1} 的曲率灵敏度和－1.92 pm/με 的应变灵敏度。差分方式的优点是测量结果仅与曲率有关，可以测量弯曲方向，但是灵敏度较低。

拼接型光纤曲率传感器可采用强度解调方法和波长解调方法，多层拼接型光纤曲率传感器的曲率分辨率较高，适用于小曲率测量。对称结构的拼接型曲率传感器不能区分弯曲方向。错位熔接可使拼接型光纤曲率传感器区分正负弯曲方向，但存在错位熔接偏移量不易控制、错位熔接点易损伤、温度灵敏度高、只能解调动态变化、不能测量曲率绝对值，以及测量范围小等问题。

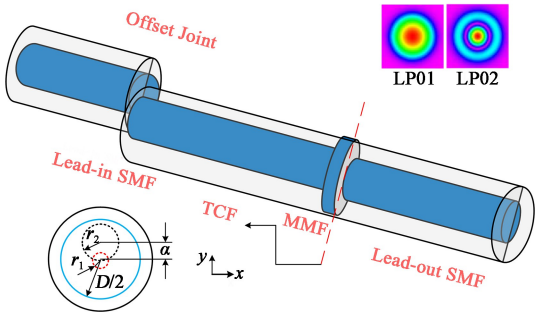


图 8　四层错位结构示意图

1.3　空腔型

空腔型光纤曲率传感器一般通过在光纤中间制作出微米级空腔而构成干涉仪，采用干涉型解调。Liao 等[49]将两根垂直切割的单模光纤插入玻璃毛细管的两端以形成微腔。微腔长度为 20.709 μm，毛细管长度为 11.28 cm。光通过微腔时产生干涉，干涉光的波长与曲率呈线性关系，在 2～14 m^{-1} 曲率范围内，曲率灵敏度达－5.960 6 nm/m^{-1}。Novais 等[50]利用电弧熔接机在两个多模光纤内部制作出长度为 225 μm 的气泡腔，如图 9 所示，采用一种基于自参考强度的法布里-珀罗腔的曲率解调方法，实现在 0～0.8 m^{-1} 曲率范围内，曲率响应灵敏度为 0.561±0.014 dB/m^{-1}，分辨率为 0.018 m^{-1}。

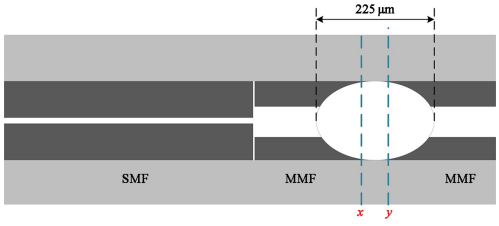


图 9　气泡腔体结构示意图

空腔型光纤曲率传感器的灵敏度和分辨率较

低，不适用于微弯测量，弯曲曲率过大会导致腔体处传输损耗增加，因而测量范围较小。但是空腔型光纤曲率传感器的制作工艺比拼接型和缺陷型简单，腔体一般外套毛细管，因此其抗拉能力也优于缺陷型和拼接型。

1.4 拉锥型

拉锥型光纤曲率传感器多采用电弧熔接机在光纤表面制作凸球状[51]或细腰形[52]锥型结构而形成干涉仪，利用干涉光谱受温度、曲率影响而实现对曲率的测量。因此，拉锥型光纤曲率传感器多采用干涉型解调方法。Raji 等[53]采用 2 个细腰形突变锥结构形成马赫-曾德尔干涉仪。传感器通过光谱内的两个波长处的光功率对温度和曲率的不相等敏感性来实现对各个参数的分别测量。实验结果表明该传感器可同时测量温度和曲率。曲率和温度灵敏度分别为 11.826 4 dBm/m^{-1}，12.488 5 dBm/m^{-1} 和 0.082 9 dBm/℃，0.083 3 dBm/℃。锥形结构的显微图如图 10 所示。

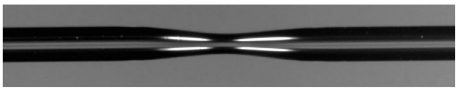


图 10 锥形结构电镜图

Meng 等[54]利用两个级联的腰部扩大的光纤锥度形成马赫-曾德尔干涉仪(MZI)进行曲率测量，同时在两个锥度之间拼接一根 16 mm 长的布拉格光栅。传感器结构如图 11 所示。布拉格光栅仅刻写在光纤纤芯内，只对温度敏感，干涉仪对曲率和温度都敏感，因此可以通过监测 MZI 和 FBG 波长变化实现对曲率和温度的同步测量。传感器在 0～3.5 m^{-1} 内，曲率灵敏度为 6.75 nm/m^{-1}，温度灵敏度为 54.7 pm/℃。

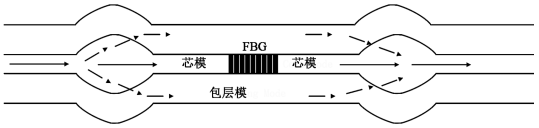


图 11 双锥形 FBG 光纤曲率传感器结构示意图

拉锥型光纤曲率传感器不能区分弯曲方向，曲率测量范围较小，测量灵敏度较高，存在温度和应变交叉敏感问题。拉锥型由于改变了光纤本身结构，因此光纤更易折断受损。

1.5 光纤光栅型

光纤光栅型曲率传感器的基本原理是利用光栅测量待测结构弯曲情况下的应变大小，利用应变与曲率的力学关系得到对应曲率。光纤光栅型曲率传感器常用光纤布拉格光栅(FBG)、长周期光纤光栅(LPFG)或者相关组合结构作为传感单元。

FBG 测量应变技术最为成熟，应用也非常广泛，自然首先被考虑用于曲率传感[55-57]。Patrick 等[58]提出了一种在 19 芯光纤上刻写布拉格光栅的制备方法，为全向光纤曲率传感器提供了一种新的思路。但是 FBG 用于曲率传感同样面临很多挑战。首先 FBG 的应变灵敏度不高，在 1.2 pm/$\mu\varepsilon$ 水平，对小曲率的测量精度不够，需要进行结构增敏；但是，FBG 测量应变的动态范围较小，如果采用较大的增敏系数，则在大曲率条件下容易造成传感器破坏；其次，受光源和解调仪的限制，在一根光纤上能够复用的 FBG 数量有限；第三，FBG 对温度和应变均敏感，抑制温度和应变交叉敏感是 FBG 曲率传感器的研究重点。

为了避免 FBG 在曲率测量中的温度和应变交叉敏感问题，有研究者提出了用 LPFG 进行曲率测量。Nascimento 等[59]在标准单模光纤上写入周期光栅制成曲率和振动传感器，其在 0～0.3 m^{-1} 内对曲率近似线性响应。Wu 等[60]通过 CO_2 激光束在空气包层薄芯光纤中写入长周期光栅，制成强度型曲率传感器，并在简支梁结构上进行了实验测试。结果显示，在 1.5～4.5 m^{-1} 内，其曲率灵敏度高达 −226 pm/m^{-1}。

为了消除温度对曲率测量的影响，Gouveia 等[61]提出了一种将大芯径光纤与光纤光栅进行错位熔接的拼接方法，其结构如图 12 所示。该方法存在两种耦合机制，一种是传输光在熔接位置从纤芯耦合到包层经 FBG 反射，另一种是传输光在纤芯中传输经 FBG 反射。第一种机制对曲率敏感，第二种机制对曲率不敏感，通过计算两种耦合机制的功率比即可实现曲率测量。在 0～1.75 m^{-1} 范围内，曲率分辨率可达 1.2×10^{-4} m^{-1}。且当曲率变化 0.15 m^{-1}、温度在 50 ℃内变化时，温度改变引起的光功率变化小于曲率的 1%/℃。

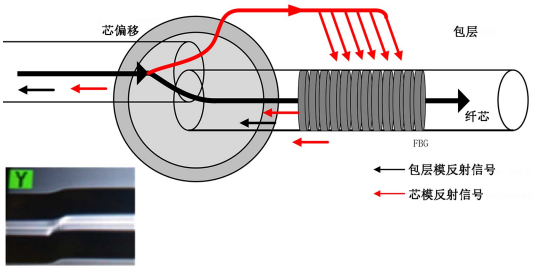


图 12 FBG 错位熔接传感器熔接示意图及熔接点显微图

1.6　分布式应变传感型

以上几种曲率传感器都基于某种特殊结构构成，在后续制作传感器阵列时会出现结构复杂、成品率低和复用数量少的问题，有可能制约光纤形态传感器的商业应用。分布式应变传感型光纤曲率传感器利用分布式光纤应变传感技术实现沿一根光纤连续的应变测量，再利用应变与曲率的力学关系得到不同位置的曲率大小。该类型曲率传感的优点是探头结构最简单、体积小、成本低、便于长距离传感。可以测量普通光纤应变的分布式光纤传感技术有 BOTDR，BOTDA，OFDR 和 C-OTDR 等。

Ba 等[62] 用推挽式悬臂梁结构演示了基于 BOTDA 的曲率测量，如图 13 所示。但是 BOTDA 的应变灵敏度低，且解调速度慢，暂时还看不到应用前景。

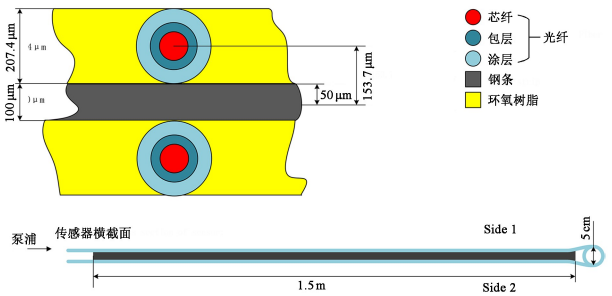


图 13　基于 BOTDA 解调的光纤曲率传感器布设示意图

OFDR 应变测量的空间分辨率可以达到厘米级，应变分辨率可达 1 $\mu\varepsilon$[63]，在短距离小尺寸的形态传感器应用方面极具前景。Luna 公司利用其先进的 OFDR 技术解调多芯光纤中的光栅阵列实现了形状和位置的测量[64]。Shao 等[65] 同样将两根光纤粘贴在 1 m 长的钢尺两侧形成推挽式结构，采用 OFDR 解调技术实现了 0～20 m^{-1} 范围内的曲率测量，曲率响应系数为 0.216 nm·m。对于 1 m 的传感距离，这种方法可实现 9.5 mm 的高空间分辨率，采样 80 个数据点耗时 0.204 8 s，但是曲率响应灵敏度明显低于其他增敏方式。

COTDR 技术对应变测量可以达到 nε 甚至 pε 水平，这样可以不需要增敏即可实现高精度的应变测量[66]。结合后续的全向型曲率传感器构成技术，未来有可能成为具有发展潜力的技术方向。

简单的传感器结构使得分布式应变型光纤曲率传感器在构建形态传感器方面极具优势。但是几种分布式应变传感技术在灵敏度、空间分辨率和时间分辨率方面还需要折中考虑。BODTR 或者 BODTA 的测量距离足够满足绝大部分应用需求，但是在测量精度和时间分辨率上还存在不足。OFDR 技术具有较高的空间分辨率，但是测量距离还非常有限。COTDR 技术具有极高的应变灵敏度和响应速度，但是空间分辨率和测量动态范围还有待提高。

1.7　小结

缺陷型光纤曲率传感器通常采用强度型解调方法，适用于小曲率弯曲情况下的曲率测量，曲率测量范围小，曲率分辨率高，可区分正负弯曲方向。拼接型光纤曲率传感器拼接方式多样，解调方法有强度型、波长型和干涉型等。其测量范围大，灵敏度高，分辨率高，可同步测量温度和应变，但是多层拼接型不具有方向性。错位拼接型具有方向性但是对温度敏感、只能解调动态变化，不能测量曲率绝对值。空腔型光纤曲率传感器多采用干涉型解调方法解调，在小曲率弯曲情况下，测量范围小，灵敏度低，适用于大曲率弯曲条件下的测量。拉锥型光纤曲率传感器的测量方法有强度型和干涉型两种，采用强度解调的拉锥型光纤曲率传感器曲率测量范围小，存在温度、曲率交叉敏感问题。光栅型光纤曲率传感器测量范围大，曲率分辨率高，加工工艺成熟，适用于小曲率弯曲情况下的曲率测量，不具有方向性，存在温度、应变交叉敏感问题。长周期光纤光栅型可解决光栅型的温度、应变交叉敏感问题，可实现对温度和应变的同步测量，但是不便于波长复用。

2　全向光纤曲率传感器

从上面的介绍中可以看出，1D 光纤曲率传感器有的可以直接测量正负向的曲率，有的可以通过预应变的方法实现正负向的曲率测量。但是要最终得到结构物的空间形态则需要得到每个传感点的曲率大小和弯曲方向。全向光纤曲率传感器主要有两种，一种是将多个单点曲率传感器按一定空间角分布组合构成，另一种是利用多芯光纤直接构成。

2.1　多传感器组合型

多传感器组合式是指利用多个 1D 曲率传感器在同一位置不同方位上组合构成一个曲率大小和弯曲方向的测量点，示意图如图 14 所示。多传感器组合型全向曲率传感最少需要两个 1D 曲率传感器成 90°布设，但是这种简单组合对于温度、拉伸等非弯曲影响因素难以消除。现实中更多的是采用 3 个曲率传感器互成 120°等边三角形布设，或由 4 个曲率

传感器间隔 90°布设，形成两对正交的推挽式 1D 曲率传感器。如图 15 所示，Koo 等[55]将 3 根光纤光栅呈等边三角形粘合在一起，制成全向曲率传感器。传感器在测量曲率的同时可以测量弯曲方向，传感器自弯曲测量的弯曲方向误差标准差为 1.44°。将这样的一个全向曲率传感器贴装在结构表面，可以实现对该结构弯曲方向的测量。

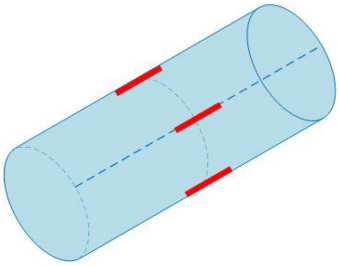


图 14 多传感器组合型示意图

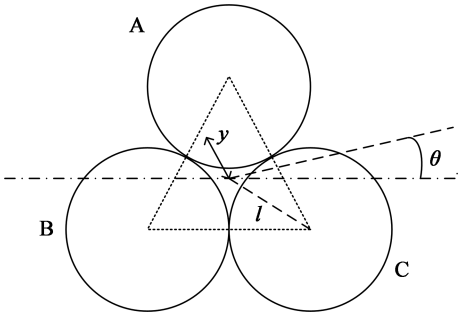


图 15 三角形机械粘合示意图[55]

Jovan 等[67]将四个锯齿缺陷型塑料光纤曲率传感器对称正交布设在长度为 1 m、直径为 30 mm 的聚酰胺圆柱梁上，如图 16 所示。传感器采用全向椭圆标定方法矫正安装角位置误差。系统弯曲方向测量误差和精度分别为±2.5°和 0.7°。Liu 等[56]将多组光纤光栅阵列采用对称正交的安装方式布设在长度为 2 m 的 ABS 棒上制成测倾仪，通过测量末端移动距离可计算出倾斜度。其最大测量误差为 9.09%。

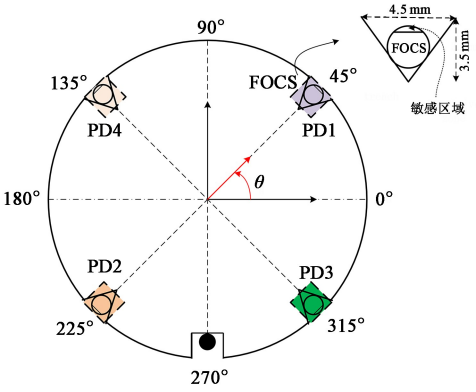


图 16 锯齿型全向光纤曲率传感器结构示意图

多传感器组合型 2D 曲率传感器可以方便地通过调整增敏结构直径调节传感器灵敏度，但是光纤曲率传感器与增敏结构的粘接存在较高的工艺难度，同时存在组合型传感器体积较大问题，不适合一些体积受限的应用场景。

2.2 多芯光纤型

基于多芯光纤的全向曲率传感器将每个纤芯作为一个 1D 曲率传感器，通过多芯结构将多个 1D 曲率传感器组合实现弯曲方向和曲率大小同步测量。这种全向曲率传感器具有结构简单，探头体积小的优势。Barrera 等[68]采用四芯光纤光栅构成阵列式二维曲率传感器，四芯光纤弯曲示意图如图 17 所示。Barrera 将 15 组四芯光纤光栅布设在 58 cm 长的基体表面制成阵列式全向曲率传感器，并将两个半径分别为 11.3 和 5.81 m^{-1} 的圆弧拼成 S 型进行了空间形状恢复实验。

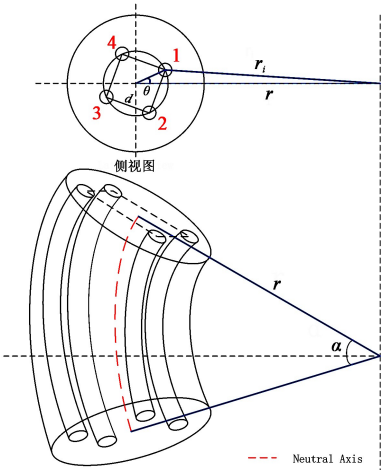


图 17 四芯光纤弯曲示意图

Jason[69]提出一种利用 OFDR 解调技术解调三芯光纤光栅阵列测量数据并通过数值求解 Frenet-Serret 方程恢复曲线形状的方法。这种方法的优势是计算出的形状是空间连续的而不是集成的离散平面弯曲结果。作者通过布设间距为 1 cm 的三芯光纤光栅验证了该方法，实验测得最大偏移位置误差是长度的 7.2%。

在各种多芯光栅中，多芯螺旋光纤光栅由于考虑了扭转因素，可为空间形态恢复提供便捷的解决方案。多芯螺旋光纤光栅可采用 OFDR 解调方法[21]和波长解调方法解调信号。Paul 等[70]利用 20 cm 长的绞合七芯光纤光栅阵列通过波长解调方法进行了曲率半径为厘米级的标准曲率圆重建。七芯扭转光纤示意图如图 18 所示。

Floris 等[71]通过在直径为 125.1 μm 的旋转多芯光纤中写入四个 FBG 制作了一个 44 mm 长的预绞光纤形状传感器，其中预扭 64.9 ran/m。最后，进行了一系列实验来验证该方法并评估传感器性能。实验结果与理论结果完全相符，证明了传感器的弹性行为，即使在高度变形的情况下也是如此。此外，所提出的基于 Spun-MCF 的形状传感器能够在±270°(±6 136.4 (°)/m)的宽动态范围内以 0.23 pm/(°)的灵敏度和 4.81°的精度测量扭曲。

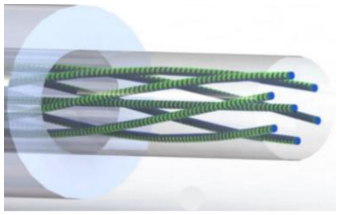


图 18　七芯扭转光纤示意图

利用多芯光纤光栅的一个栅区即可实现曲率和弯曲方向的同步测量。随着芯数增加，可以得到更多组数据，有利于消除扭转、温度等非弯曲因素对测量结果的影响。同时，由于光纤光栅加工工艺的日益成熟，多芯光纤光栅全向曲率传感器为光纤形态传感提供了灵活的实现方式。但是多芯光纤纤芯间距不确定、不同纤芯的应变差异等因素会影响曲率和弯曲方向测量精度。Floris 等[72]提出了一种蒙特卡罗迭代方法来降低应变不确定对测量结果的影响进而提升传感器测量精度。

2.3　纯光纤型

纯光纤型采用普通单模光纤作为传感单元，利用分布式解调技术实现曲率测量。纯光纤型具有探头简单，易于实现等优点。Issatayeva 等[73]介绍了一种将 4 根光纤互成 90°沿医疗介入针粘合，并采用 OFDR 技术解调的光纤形态传感器并介绍了这种微创手术针头形状重建系统的温度补偿方法。传感器有两对相反的光纤，每对光纤测量相同的温度变化和相反的应变。将每对光纤的光谱偏移相加以仅找到温度分量，并将结果从整个光谱偏移中减去，以找到每根光纤检测到的应变变化。Issatayeva[20]等在此基础上采用散射级别复用方法(SLMux)将普通光纤换成标准单模光纤(SMF)和散射功率高出 35～40 dB 的 MgO 纳米颗粒掺杂光纤组合进行性能分析。传感器针对小弯曲(0.1～0.5 cm)的系统精度为 90%，大弯曲(0.6～1 cm)的系统精度约为 92%。Cheng[74]采用瑞利反向散射传感器(RBS)实现光束状结构的形状传感。与基于光纤布拉格光栅(FBG)传感器的传统形状传感系统相比，RBS 能够进行连续横向传感。与其他类型的分布式光纤传感器(FOS)相比，RBS 具有更高的空间分辨率。尹国路[75]等以镍铬形状记忆合金丝作为增敏基体(如图 19)，以普通光纤作为传感单元，采用 OFDR 解调技术进行了二维和三维实验，二维实验采用亚克力曲率块标定，三维实验采用螺旋桶标定。该传感器的二维、三维形状恢复末端的平均最大误差为传感器总长度的 0.58%和 3.45%。

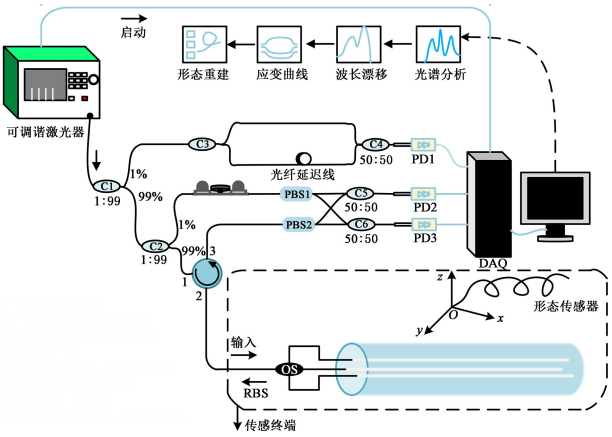


图 19　基于 OFDR 解调技术的分布式形状传感系统图[75]

纯光纤型全向曲率传感器传感单元结构简单，易于嵌入基体，但是解调系统复杂，且空间分辨率取决于解调系统能力，布设间距不如光栅式灵活。适用于大尺度、小曲率弯曲情况下的曲率测量。

3　空间形态恢复

多个全向光纤曲率传感器按一定间距构成光纤形态传感线性阵列。各全向曲率传感器获得相应位置的空间曲率经过插值得到沿阵列密集分布的各点空间曲率数据，然后通过形态恢复算法递推得到传感阵列上各点的三维坐标。将传感阵列附着在待测结构上，即可得到待测结构的形态数据。结合不同的应用场景可以采用不同的传感器分布方式和不同的恢复算法。

3.1　形态恢复算法

空间形态恢复过程第一步是曲率数据插值，第二步是基于曲率的形态恢复。采用分立式光纤曲率传感器构成的形态传感器只能测量有限的离散曲率数据点。为了满足微分几何理论要求，必须进行插值处理才能得到足够密集的数据点来实现空间形态

恢复。采用 OFDR 分布式光纤传感技术可以获得极高的空间分辨率一般不用进行插值。其他分布式传感技术由于空间分辨率有限通常也需要进行插值处理。插值处理的理论基础是一个实际的结构弯曲，是连续缓变的，只要传感器布设的空间频率远大于结构变形的空间频率，这种插值是合理的。线性插值、平方平均值、二次函数拟合、样条插值等方法在形态恢复应用中的特点已被研究[76-77]，研究表明三次样条插值方法在内窥镜形态恢复应用中更有优势。Henken 等[78]的研究结果也表明当 FBG 数达到 5 个以上时，基于最高阶多项式的插值方法和基于样条插值方法得到的形态恢复误差最低，但是最高阶多项式插值法在边界处不稳定。

弗雷内(Frenet)标架法是空间曲线形态恢复的常用方法。该方法的理论基础是任何非零曲率的规则三维曲线的形状都可以由它的曲率和挠率决定。利用三维空间中曲线的切向量、法向量和副法向量建立起弗雷内标架，形成两点之间坐标的变换关系，通过递推关系来恢复传感器的形态[79]。Moore 等利用该方法和三芯光纤构成的分布式曲率传感器阵列重构出了附着在圆柱体表面的光纤形态。Al-Ahmad 等[80]针对七芯光纤光栅形态传感器提出了一种两步校准的方法，用于固有扭曲补偿，显著提高了形态恢复的估计精度。

弗雷内标架法是目前最常用于光纤形态传感的曲线重构算法，但是该方法在测量点曲率为零的情况下会导致曲线法平面产生不确定性，因此不适用于存在直线和局部曲率为零的曲线。

平行传输标架法最早由 Bishop 于 1975 年提出。该方法直接将空间曲率在法向量和副法向量上投影，不再需要切向向量沿曲线方向求导过程，从而有效地消除弗雷内标架中出现奇异点和不连续点的问题。2018 年 Cui 等[81]利用平行传输框架在分布应变中进行了三维空间曲线的重构仿真结果表明，当曲线存在奇异点和曲率为零的点时，特别是在采样点较少的情况下，平行传输框架比弗雷内标架更准确、更稳定。2020 年 Khan 等[82]使用平行传输框架恢复了光纤形态。相比于弗雷内标架，这种方法对二次可微的曲线同样有效，且更适合于具有局部线性或曲率不连续的曲线。

3.2 虚拟形态传感器阵列

用多个全向曲率传感器构成形态传感器阵列可以实现全过程的实时测量，但是阵列制作成本、传感器标定和形态恢复计算的工作量都会很大。所谓虚拟阵列法就是采用一个全向曲率传感器沿某路径逐点测量不同位置的弯曲参数，并利用 Donder 等[19]在 2021 年提出的一种通过单一传感器虚拟阵列恢复针尖轨迹的形态恢复方法。此方法的应用背景是医疗介入针的形状恢复。假设针尖运动轨迹与纤维形状重合，纤维形状就是针尖运动轨迹，因此通过测量尖端一组 FBG 数据的连续变化即可计算沿纤维长度方向各点应变分布，并采用 Kalman 滤波技术实现了形态恢复。如图 20 所示是单 FBG 虚拟阵列方法的传感器布设示意图。虚拟阵列方法为计算运动轨迹需求和无法刻写多 FBG 阵列情况下的形态恢复提供了新的解决方法。

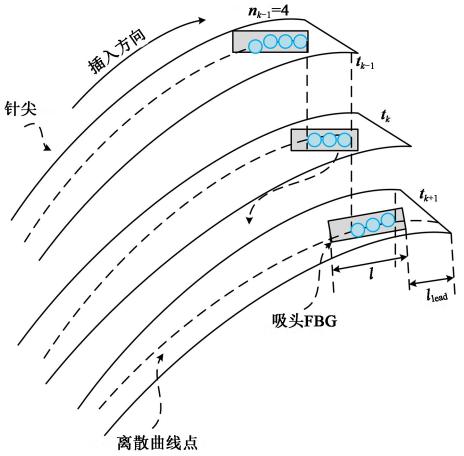


图 20 四芯光纤单 FBG 虚拟阵列示意图[19]

3.3 多源传感器数据融合

基于全向曲率传感器的阵列形态恢复算法存在沿长度方向的累积误差，距离越长误差越大，特别是存在非线性弯曲段时误差会更大。采用多种传感器进行数据融合算法，可以有效降低形态恢复的累积误差。

2016 年，Twente 大学的 Shahriari[83]将利用三个光纤光栅阵列构成的形态传感器获得的穿刺针的形态数据，与超声影像获得的针尖数据通过无迹卡尔曼滤波算法进行数据融合，对针尖实现更可靠的定位。2018 年，Denasi 等[84]使用 Luenberger 和 Kalman 两种方法融合横向二维超声图像获取的针尖位置与 FBG 得到的阵列数据，利用相机对实验结果评估，最终得到的欧氏误差均值和标准差分别为(0.2±0.11) mm 和(0.18±0.13) mm。将光纤形态传感器与其他传感器相结合，利用多源数据融合的思想消除传感阵列的误差是目前提高传感器精度

的一大突破。2021 年，Donder 等[19]将一组光纤光栅布设在可移动针尖中，通过 Kalman 滤波融合当前光栅的曲率信息和前一时段产生的 FBG 数据集，并利用 EM 传感器加以修正，实现了由一组 FBG 恢复针尖移动的轨迹。目前多传感器数据融合的形态恢复算法还在起步阶段，但是为形态恢复提供了新的研究方向。

4　结论与展望

光纤形态传感器由于其独特的优势吸引了越来越多的关注，上文以一维曲率传感器、全向曲率传感器和空间形态传感器为线索梳理了相关技术的发展现状。大量研究者对光纤形态传感器多项关键技术开展了深入的研究，未来光纤形态传感器要走向成熟还面临诸多挑战。

首先是温度应变交叉敏感问题。目前所有的光纤曲率传感器均对温度较为敏感，难以从器件制作水平上彻底消除。常规的做法是进行温度补偿，一种是在曲率传感器中加入不受弯曲影响的温度传感器，利用温度测量结果对传感器的温度系数进行补偿。这种方法一方面会增加传感器的数量，另一方面由于温度分布的不均匀性，补偿效果不理想；另一种方式是利用全向曲率传感器组对应变响应不同，而对温度响应相同的特性进行温度补偿[73]。这些方法虽有初步尝试，但是具体抑制效果如何，特别是温度变化对最终形态恢复精度的影响还鲜见报道。

其次是传感器的扭转问题。扭转会引起密切平面的旋转，必须仔细考虑，否则会显著影响形态恢复精度。现有的光纤形态传感器多数采用多弯曲组合形态恢复，其实质依旧是平面曲线的形态恢复。解决传感器扭转问题一方面可以采用抗扭转的高强度材料制作传感器，保证外力不会造成传感器的扭转。这种方法在光纤形态传感器与待测结构非紧密结合的条件下可以有效工作。另一种方法就是在光纤形态传感器制作过程中添加扭转传感器。Floris 等[71]利用 Saint-Venant's 扭转理论对预扭转多芯光纤光栅形态传感器的扭转传感特性进行了研究，实际测得光纤的扭转灵敏度，但是还没有在三维形状恢复中得到应用。目前对光纤形态传感器的扭转问题还需深入研究。

第三，光纤形态传感器形态恢复算法的噪声抑制问题。目前对于形态恢复算法仅从理论上开展了相关研究，对于各传感器存在的噪声问题还未见报道。特别是对离散型阵列布设方式进行插值时没有考虑传感器本身的力学特点，导致形态恢复精度难以提高。此外，单个全向曲率传感器必然存在测量误差，这种误差特性是什么，以及采用何种算法可以对这种误差进行抑制，以减少形态恢复算法中的累积误差，这是提升形态恢复精度有待研究的重点问题。

参考文献：

[1] Koch E, Dietzel A. Surface reconstruction by means of a flexible sensor array[J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2017, 267: 293-300.

[2] Schaefer P L, Barrier G, Chagnon G, et al. Strain gauges based 3D shape monitoring of beam structures using finite width gauge model[J]. Experimental Techniques, 2019, 43(5): 599-611.

[3] De Gelidi S, Seifnaraghi N, Bardill A, et al. Torso shape detection to improve lung monitoring[J]. Phys. Meas., 2018, 39(7): 074001.

[4] Porcu M C, Patteri D M, Melis S, et al. Effectiveness of the FRF curvature technique for structural health monitoring[J]. Construction and Building Materials, 2019, 226: 173-187.

[5] Stollenwerk K, Müllers J, Müller J, et al. Evaluating An Accelerometer-based System for Spine Shape Monitoring[M]. Computational Science and Its Applications-ICCSA, 2018: 740-756.

[6] Dementyev A, Kao H-L, Paradiso J A. SensorTape[Z]. Proc. of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology, 2015: 649-658.

[7] Plamondon A, Delisle A, Larue C, et al. Evaluation of a hybrid system for three-dimensional measurement of trunk posture in motion[J]. Appl Ergon, 2007, 38(6): 697-712.

[8] Griffith C, Dare P, Danish L. Calibration enhancement of ShapeAccelArray technology for long term deformation monitoring applications[C]// IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. IEEE, 2010: 621-626.

[9] Green G E, Mikkelsen P E. Deformation measurements with inclinometers[J]. Transportation Research Record, 1988.

[10] Hou X M, Yang X S, Huang Q. Using inclinometers to measure bridge deflections[J]. Bridge Construction, 2005, 10: 564-569.

[11] Stark T D, Choi H. Slope inclinometers for landslides[J]. Landslides, 2008, 5(3): 339-350.

[12] Cha Y-J, Choi W, BüYüKöZTüRK O. Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2017, 32(5): 361-378.

[13] Ye X W, Dong C Z, Liu T. A review of machine vision-based structural health monitoring: Methodologies and applications[J]. J. of Sensors, 2016, 2016(7): 1-10.

[14] Mullen L J, Vieira A J C. Application of RADAR technology to aerial LIDAR systems for enhancement of shallow underwater target detection[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory & Techniques, 1995, 43(9): 2370-2377.

[15] Gentile C, Bernardini G. Radar-based measurement of deflections on bridges and large structures[J]. European J. of Environmental and Civil Engineering, 2011, 14(4): 495-516.

[16] Milillo P, Fielding E J, Shulz W H, et al. COSMO-SkyMed spotlight interferometry over rural areas: The Slumgullion landslide in Colorado, USA[J]. IEEE J. of Sel. Top. in Appl. Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(7): 2919-2926.

[17] Choi S W, Kim B R, Lee H M, et al. A deformed shape monitoring model for building structures based on a 2D laser scanner[J]. Sensors (Basel), 2013, 13(5): 6746-6758.

[18] Bednarz B, Popielski P, Sienko R, et al. Distributed fibre optic sensing (DFOS) for deformation assessment of composite collectors and pipelines[J]. Sensors (Basel), 2021, 21(17): 5904.

[19] Donder A, Baena F R Y. Kalman-filter-based, dynamic 3-D shape reconstruction for steerable needles with fiber Bragg gratings in multicore fibers[J]. IEEE Trans. on Robotics, 2021: 1-14.

[20] Issatayeva A, Amantayeva A, Blanc W, et al. Design and analysis of a fiber-optic sensing system for shape reconstruction of a minimally invasive surgical needle[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 8609.

[21] Galloway K C, Chen Y, Templeton E, et al. Fiber optic shape sensing for soft robotics[J]. Soft Robot, 2019, 6(5): 671-684.

[22] Gherlone M, Cerracchio P, Mattone M. Shape sensing methods: Review and experimental comparison on a wing-shaped plate[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2018, 99: 14-26.

[23] Ferreira P, Caetano E, Pinto P. Real-time flying shape detection of yacht sails based on strain measurements[J]. Ocean Engineering, 2017, 131: 48-56.

[24] Yin Y, Yu P, Jia Z, et al. An approach of the maximum curvature measurement of dynamic umbilicals using OFDR technology in fatigue tests[J]. Frontiers in Materials, 2021, 8: 717190.

[25] Fu Y, Di H, Liu R. Light intensity modulation fiber-optic sensor for curvature measurement[J]. Optics & Laser Technology, 2010, 42(4): 594-599.

[26] Fu Y, Di H. Fiber-optic curvature sensor with optimized sensitive zone[J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(3): 586-591.

[27] Markovic M Z, Bajic J S, Vrtunski M, et al. Application of fiber-optic curvature sensor in deformation measurement process[J]. Measurement, 2016, 92: 50-57.

[28] Stupar D Z, Bajic J S, Manojlovic L M, et al. Wearable low-cost system for human joint movements monitoring based on fiber-optic curvature sensor[J]. IEEE Sensors J., 2012, 12(12): 3424-3431.

[29] Leal-Junior A G, Frizera A, José Pontes M. Sensitive zone parameters and curvature radius evaluation for polymer optical fiber curvature sensors[J]. Optics & Laser Technol., 2018, 100: 272-281.

[30] Yang Yang, Zhu Xiaotong, Yan Liangjun, et al. A highly accurate curvature sensor based on a rough side-polished single-mode fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1406004.

[31] Culshaw B, Gong Y, Liao Y, et al. Fiber-optic curvature sensor based on step-index multimode fiber[Z]. 2011 Inter. Conf. on Optical Instruments and Technology: Optical Sensors and Applications. 2011. 10. 1117/12. 904127.

[32] Ma L, Qi Y, Kang Z, et al. All-fiber strain and curvature sensor based on no-core fiber[J]. IEEE Sensors J., 2014, 14(5): 1514-1517.

[33] Rodríguez-Vera R, Guzman-Sepulveda J R, Díaz-Uribe R, et al. Measurement of curvature and temperature using multimode interference devices[Z]. 22nd Congress of the Inter. Commission for Optics: Light for the Development of the World. 2011. 10. 1117/12. 903448.

[34] Fu X, Wen J, Zhang Y, et al. Experimental and theoretical analysis of curvature sensor based on cladding mode resonance with triple cladding quartz specialty fiber[J]. Optics Communications, 2018, 429: 5-11.

[35] Silva S, FrazãO O, Viegas J, et al. Temperature and strain-independent curvature sensor based on a singlemode/multimode fiber optic structure[J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(8): 085201.

[36] Gong H, Song H, Li X, et al. An optical fiber curvature sensor based on photonic crystal fiber modal interferometer [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 195: 139-141.

[37] Herrera-Piad L A, Hernandez-Romano I, May-Arrioja D A, et al. Sensitivity enhancement of curvature fiber sensor based on polymer-coated capillary hollow-core fiber[J]. Sensors (Basel), 2020, 20(13): 3763.

[38] Salceda-Delgado G, Martinez-Rios A, Selvas-Aguilar R, et al. Adaptable optical fiber displacement-curvature sensor based on a modal Michelson interferometer with a tapered single mode fiber[J]. Sensors (Basel), 2017, 17(6): 1259.

[39] Zhao Y, Gao P, Yang Y. Temperature insensitive curvature sensor based on a combination interference structure and an intensity demodulation method[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2015, 57(4): 806-809.

[40] Su B, Zhang F, Zhong L, et al. Temperature compensated curvature sensor with insensitive axial strain based on tapered ring core fiber interferometer[J]. Opt. Communications,

2022，513：128067.

[41] Gong H，Song H，Zhang S，et al. Curvature sensor based on hollow-core photonic crystal fiber sagnac interferometer[J]. IEEE Sensors J.，2013，14(3)：777-780.

[42] Zhao Y，Cai L，Li X G. Temperature-insensitive optical fiber curvature sensor based on SMF-MMF-TCSMF-MMF-SMF structure [J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement，2017，66(1)：141-147.

[43] Marrujo-García S，Hernández-Romano I，Torres-Cisneros M，et al. Temperature-independent curvature sensor based on in-fiber Mach-Zehnder interferometer using hollow-core fiber[J]. J. of Lightwave Technol.，2020，38(15)：4166-4173.

[44] Liu Y，Dong J，Huang L，et al. Investigations on seven-core fiber based interferometric all-fiber sensor for curvature and temperature measurements[J]. Optik，2022，254：168638.

[45] Xiao D，Wang G，Yu F，et al. Optical curvature sensor with high resolution based on in-line fiber Mach-Zehnder interferometer and microwave photonic filter [J]. Opt. Express，2022，30(4)：5402-5413.

[46] Ding L，Yu L，Hu G，et al. Knee joint curvature detection system based on fiber optic Mach-Zendler interferometric curvature sensor [J]. IEEE Sensors J.，2021，21(24)：28017-28024.

[47] Xu S，Chen H，Feng W. Fiber-optic curvature and temperature sensor based on the lateral-offset spliced SMF-FCF-SMF interference structure [J]. Opt. & Laser Technol.，2021，141：107174.

[48] Zhang X，Liu C，Liu J，et al. Single modal interference-based fiber-optic sensor for simultaneous measurement of curvature and strain with dual-differential temperature compensation[J]. IEEE Sensors J.，2018，18(20)：8375-8380.

[49] Liao N，He L，Ma L，et al. A sensitivity-enhanced micro-cavity extrinsic Fabry-Perot interferometric fiber-optic curvature sensor[J]. Optik-Inter. J. for Light and Electron Optics，2020，221：165310.

[50] Novais S，Silva S O，Frazao O. A self-referencing intensity-based Fabry-Perot cavity for curvature measurement [J]. IEEE Sensors Lett.，2019，3(10)：1-4.

[51] Robalinho P，Frazão O. Fiber microsphere coupled in a taper for a large curvature range[J]. Fibers，2019，7(10)：87.

[52] Lin H S，Raji Y M，Lim J H，et al. Packaged in-line Mach-Zehnder interferometer for highly sensitive curvature and flexural strain sensing [J]. Sensors and Actuators A：Physical，2016，250：237-242.

[53] Raji Y M，Lin H S，Ibrahim S A，et al. Intensity-modulated abrupt tapered fiber Mach-Zehnder Interferometer for the simultaneous sensing of temperature and curvature [J]. Optics & Laser Technology，2016，86：8-13.

[54] Meng Q，Dong X，Chen Z，et al. Simultaneous measurement of curvature and temperature based on two waist-enlarged fiber tapers and a fiber Bragg grating[C]// Photonics Global Conference. IEEE，2012.

[55] Koo B，Kim D H. Directional bending sensor based on triangular shaped fiber Bragg gratings[J]. Opt. Express，2020，28(5)：6572-6581.

[56] Liu H-L，Zhu Z-W，Zheng Y，et al. Experimental study on an FBG strain sensor[J]. Optical Fiber Technol.，2018，40：144-151.

[57] Zhang Xiongxiong，Song Yanming，Sun Guangkai，et al. Fiber Bragg grating curvature sensor based on flexible composite matrix[J]. Infrared and Laser Engineering，2019，48(2). doi:10.378811RLA201948.0222001.

[58] Danisch L A. Fiber Optic Curvature Sensor：WO，WO2000068645 A1[P].

[59] Lewis E，Nascimento I M，Chesini G，et al. LPG-based sensor for curvature and vibration [Z]. Sixth European Workshop on Optical Fibre Sensors. 2016. 10. 1117/12. 2237041.

[60] Wu C，Feng Z W，Liu Z，et al. Curvature sensor based on an LPG written in an air-clad thin-core fiber[C]// 2016 15th Inter. Conf. on Optical Communications and Networks (ICOCN). IEEE，2016.

[61] Gouveia C，Jorge P A S，Baptista J M，et al. Temperature-independent curvature sensor using FBG cladding modes based on a core misaligned splice [J]. IEEE Photon. Technol. Lett.，2011，23(12)：804-806.

[62] Ba D，Chen C，Fu C，et al. A high-performance and temperature-insensitive shape sensor based on DPP-BOTDA [J]. IEEE Photon. J.，2018，10(1)：1-10.

[63] Kreger S T，Gifford D K，Froggatt M E，et al. High resolution distributed strain or temperature measurements in single- and multi-mode fiber using swept-wavelength interferometry[J]. Ofs，2006. doi：10. 131410FS. 2006. ThE42.

[64] Duncan R G，Inaudi D，Raum M T，et al. Characterization of a fiber-optic shape and position sensor [Z]. Smart Structures and Materials 2006：Smart Sensor Monitoring Systems and Applications. 2006. 10. 1117/12. 658535.

[65] Shao C，Yin G，Lv L，et al. OFDR with local spectrum matching method for optical fiber shape sensing[J]. Appl. Physics Express，2019，12(8)：082010. 1-082010. 4.

[66] Koyamada Y，Imahama M，Kubota K，et al. Fiber-optic distributed strain and temperature sensing with very high measure and resolution over long range using coherent OTDR [J]. J. of Lightwave Technol.，2009，27(9)：1142-1146.

[67] Jovan S B，Markovic M Z，JožA A，et al. Design calibration and characterization of a robust low-cost fiber-optic 2D deflection sensor[J]. Sensors and Actuators A：Physical，2017，267：278-286.

[68] Barrera D，Gasulla I，Sales S. Multipoint two-dimensional

curvature optical fiber sensor based on a nontwisted homogeneous four-core fiber[J]. J. of Lightwave Technol., 2015, 33(12): 2445-2450.

[69] Jason M P. Shape sensing using multi-core fiber [C]// Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, IEEE, 2015.

[70] Westbrook P S, Kremp T, Feder K S, et al. Continuous multicore optical fiber grating arrays for distributed sensing applications[J]. J. of Lightwave Technol., 2017, 35(6): 1248-1252.

[71] 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: 106700.1-106700.9.

[72] Floris I, Sales S, CalderóN P A, et al. Measurement uncertainty of multicore optical fiber sensors used to sense curvature and bending direction[J]. Measurement, 2019, 132: 35-46.

[73] Issatayeva A, Amantayeva A, Blanc W, et al. Temperature compensation of the fiber-optic based system for the shape reconstruction of a minimally invasive surgical needle[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 329: 112795.

[74] Xu C, Sharif Khodaei Z. Shape sensing with Rayleigh backscattering fibre optic sensor[J]. Sensors (Basel), 2020, 20(14): 4040.

[75] 尹国路, 徐 州, 蒋 锐, 等. 基于光频域反射仪的光纤分布式三维形状传感技术[J]. 光学学报, 2022, 42(1): 11.
Yin Guolu, Xu Zhou, Jiang Rui, et al. Optical fiber distributed three-dimensional shape sensing technology based on optical frequency-domain reflectometer[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(1): 11.

[76] 朱晓锦, 季玲晓, 张合生, 等. 基于空间正交曲率信息的三维曲线重构方法分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(2): 305-313.
Zhu Xiaojin, Ji Lingxiao, Zhang Hesheng, et al. Analysis of 3D curve reconstruction method using orthogonal curvatures [J]. J. of Basic Science and Engineering, 2011, 19(2): 305-313.

[77] 肖 海, 章亚男, 沈林勇, 等. 光纤光栅曲线重建算法中的曲率连续化研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(5): 993-999.
Xiao Hai, Zhang Yanan, Shen Linyong, et al. Research on curvature serialization in the curve reconstruction algorithm based on fiber Bragg gratings [J]. Chinese J. of Scientific Instrument, 2016, 37(5), 993-999.

[78] Erroranalysis of FBG-based shape sensors for medical needle tracking[J]. IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, 2014, 19(5): 1523-1531.

[79] Jason P M. Shape sensing using multi-core fiber[C]// 2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), IEEE, 2015.

[80] 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.

[81] Cui J, Zhao S, Yang C, et al. Parallel transport frame for fiber shape sensing[J]. IEEE Photon. J., 2018, 10(1): 1-12.

[82] Khan F, Donder A, Galvan S, et al. Pose measurement of flexible medical instruments using fiber Bragg gratings in multi-core fiber[J]. IEEE Sensors J., 2020, 20(18): 10955-10962.

[83] Okamura E, Shahriari N, Roesthuis R, et al. Steering an actuated-tip needle in biological tissue: Fusing FBG-sensor data and ultrasound images[C]// Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2016.

[84] Denasi A, Khan F, Boskma K J, et al. An observer-based fusion method using multicore optical shape sensors and ultrasound images for magnetically-actuated catheters[C]// IEEE Inter. Conf. on Robotics & Automation. IEEE, 2018.

作者简介:

杨 洋(1993—),女,2017 年获哈尔滨工程大学学士学位,2020 年获哈尔滨工业大学硕士学位,现为哈尔滨工业大学-南方科技大学联合培养博士研究生,研究方向包括光纤形态传感、光纤光栅传感、分布式光纤传感,以及强度型光纤传感技术等;

宋章启(1973—),男,博士,教授,博士生导师;2007 年获国防科技大学光学工程博士学位;研究方向包括光纤信息技术、水声探测技术、微纳光纤传感技术、强度型一体化传感器技术和摄影测量技术等;曾任国防科学技术大学海洋声学所副所长,现为兵工学会光电子专业委员会委员;先后主持和参与多项国家重大专项等项目,已发表论文 50 余篇,授权国家发明专利等 10 余项。