基于并联集成光纤布拉格光栅的温度不敏感矢量弯曲传感器

邵来鹏^{1,2}, 包维佳^{1,2}, 刘申^{1,2}, 杜斌^{1,2}, 杨凯明^{1,2}, 付彩玲^{1,2}, 刘雪雅^{1,2}, 李正勇^{1,2}, 王义平^{1,2*}

1. 深圳大学物理与光电工程学院, 光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 深圳 518060;

2. 深圳大学广东省光纤传感技术粤港联合研究中心, 深圳市物联网光子器件与传感系统重点实验室, 深圳 518060

* E-mail: ypwang@szu.edu.cn

收稿日期: 2020-07-03; 接受日期: 2020-10-20; 网络版发表日期: 2020-12-11

国家自然科学基金(批准号: 61635007)、广东省自然科学基金(编号: 2019A050510047, 2019B151520042, 2018A030310581)、深圳市科技创新委员会(编号: JCYJ20170818143853289, JCYJ20180305125352956)和深圳市基础研究计划自由探索项目(编号: JCYJ20170818143853289)资助

摘要 本文提出一种利用飞秒激光逐线法制备并联集成光纤光栅阵列的技术, 该光纤光栅阵列中的每个光纤光栅被制备在多模光纤芯轴向上的相同位置但是径向的不同方位. 利用该光纤光栅阵列实现了温度不敏感的矢量弯曲传感器, 该传感器不仅可以实现弯曲曲率的测量, 而且可以实现任意弯曲方向的判定. 通过引入等效光纤光栅的解调方法, 即对光纤光栅的反射波长变化做差分运算克服了该传感器弯曲和温度之间的交叉敏感问题, 同时将传感器的弯曲灵敏度提高了几乎一倍, 从而极大地提高了弯曲传感器的分辨率. 因此, 该矢量弯曲传感器可实现智能工程结构的弯曲曲率和弯曲方向的实时监测.

关键词 光纤传感器, 光纤光栅, 弯曲传感器, 矢量传感器, 飞秒激光

1 引言

随着机器人、航天航空和汽车工业等结构健康监测对弯曲测量的需求日益增加. 基于光纤的弯曲传感器已被广泛报道, 如基于马赫-增德尔干涉仪的光纤弯曲传感器^[1~4]和基于特种光纤的弯曲传感器^[5~8]. 目前, 基于光纤光栅的弯曲传感器被相继报道, 如长周期光纤光栅、倾斜光纤光栅和光纤布拉格光栅(fiber bragg gratings, FBGs)^[9~11], 但是这些光纤光栅一般都是制备

在标准单模光纤中, 通常只能测量弯曲曲率, 不能判别弯曲方向. 长周期光纤光栅的透射波长和强度对弯曲很敏感, 是一种理想的弯曲传感器, 但是光栅光谱带宽较宽, 导致传感器的解调困难^[12~15]. 倾斜光纤光栅的栅区与光纤轴线存在一定的倾斜角度, 它将纤芯基模耦合至包层中, 从而激发对弯曲灵敏的包层模式, 实现弯曲方位的测量, 但是倾斜光纤光栅的制备工艺相比于光纤布拉格光栅繁琐, 模式激发复杂, 在实际应用中解调困难^[16~17]. 最近, Osório等人^[18]报道了一

引用格式: 邵来鹏, 包维佳, 刘申, 等. 基于并联集成光纤布拉格光栅的温度不敏感矢量弯曲传感器. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 241–248
Shao L P, Bao W J, Liu S, et al. Temperature-insensitive vector bending sensor based on parallel-integrated fiber Bragg gratings (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 241–248, doi: [10.1360/SST-2020-0276](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0276)

种基于表面-纤芯光纤光栅的弯曲矢量传感器, 该传感器只能实现对称的两个方向的弯曲传感. Yang等人^[19]利用飞秒激光刻蚀法在双芯少模光纤中写入光纤布拉格光栅, 该光栅虽然可以实现特定方向的弯曲矢量传感, 但需要精准地控制偏置耦合对光纤光栅的模式激励. Hou等人^[20]展示了基于七芯光纤光栅的二维矢量弯曲传感器, 该传感器可以实现任意方向的弯曲矢量传感, 但是该传感器需要使用扇入/输出耦合装置, 对每个纤芯中的信号进行独立的检测, 增加了传感器的复杂度. 此外, 光纤型弯曲传感器虽然具有较高的弯曲灵敏度, 但通常存在温度和弯曲之间的交叉敏感问题, 从而导致弯曲测量误差^[21].

本文利用飞秒激光逐线法在多模光纤中制备了一种新型的并联集成光纤光栅(parallel-integrated fiber bragg gratings, PI-FBGs). 该并联集成光纤光栅可以实现任意方向的矢量弯曲传感, 通过引入等效光纤光栅的解调方法, 也就是对光纤布拉格光栅的反射波长变化做差分数值计算将弯曲灵敏度提高一倍, 同时克服了温度和弯曲之间的交叉敏感问题.

2 并联集成光纤光栅制备技术

我们利用图1所示的飞秒激光逐线法在多模光纤中制备了并联集成光纤光栅. 实验中利用的飞秒激光器的中心波长为800 nm, 重复频率为1 kHz, 脉冲宽度为100 fs. 光路中的一个快门用来打开或关闭激光光束, 旋转光路中的半波片可以调节激光能量. 将一对旋转夹具固定在高精度三维位移电动平台上, 光纤两

端分别被固定在旋转夹具的轴线上, 从而实现光纤的旋转和三维移动. 激光光束被显微物镜垂直聚焦到光纤纤芯中, 激光焦斑直径约1 μm . 为了在制备过程中实时监测光纤光栅的反射光谱变化, 我们使用了一台光纤光谱仪(YOKOGAWA, AQ6370D)和一台宽带光源(ASE LIGHT SOURCE). 同时, 我们使用了一种渐变折射率多模光纤, 目的是在该光纤的纤芯中制备如图1(b)所示的并联集成光纤光栅, 该光纤的纤芯和包层直径分别为62.5和125 μm .

Wang等人^[22]利用飞秒激光逐点法在标准单模光纤的纤芯中成功制备了并联集成光纤光栅阵列. 该光纤光栅阵列中的每个光纤光栅距离光纤轴线的间距太近(约2 μm), 导致该并联集成光纤光栅对弯曲不敏感, 不能用于弯曲传感. 为了增加光纤光栅和光纤轴线的间距, 本文选用多模光纤并利用飞秒激光逐线法制备并联集成光纤光栅阵列. 在本实验中激光光束固定不动, 光纤随着三维电动平台的运动而移动, 这相当于激光束相对于光纤运动. 因此, 为了描述和理解方便, 下文中描述为激光束移动. 首先, 如图1(b)插图所示, 利用电动平台使聚焦的飞秒激光光束沿“ A_1B_1 ”所示的轨迹以 v 的速度划线(即激光曝光), 通过多光子吸收效应诱起光纤折射率调制, 从而制备出第一个光纤光栅(FBG₁)的第一个光栅周期, 每个周期中激光曝光的长度为5 μm .

第二步, 关闭图1(a)所示光路中的快门(shutter), 通过电动平台使激光束快速移动到“ A_2 ”点后立即打开快门; 然后, 通过电动平台使激光光束沿“ A_2B_2 ”所示的轨迹以 v 的速度划线, 即制备出FBG₁的第二个光栅周期.

图1 (网络版彩图)飞秒激光逐线法制备并联集成光纤光栅系统. (a) 制备装置; (b) 并联集成光纤光栅示意图

Figure 1 (Color online) PI-FBGs fabrication system using femtosecond laser line-by-line technology. (a) Fabrication system; (b) schematic diagram of PI-FBGs.

重复以上步骤制备FBG₁的第三个光栅周期、第四个光栅周期、……,直至制备完最后一个光栅周期,从而获得逐线法制备的光纤光栅FBG₁. 每一个光栅周期“ A_1B_1 ”, “ A_2B_2 ”, ……,” A_nB_n ”处于同一个平面上,该平面和光纤轴线的距离约为12 μm ,即FBG₁和光纤轴线的间距约为12 μm . 通过固定在电动平台上的旋转夹具使光纤绕轴线旋转90°, 180°和270°,然后,利用以上的步骤分别制备第二个、第三个和第四个光纤光栅FBG₂, FBG₃和FBG₄. 如图1(b)和图2(a)所示, FBG₁, FBG₂, FBG₃和FBG₄分别被制备在该多模光纤纤芯的0°, 90°, 180°和270°方位, 光纤光栅的反射波长依次为1509.78, 1529.86, 1547.19和1568.16 nm, 其光栅周期分别为2.058, 2.083, 2.11和2.14 μm , 每个光栅都具有1500个周期. 因此, 我们利用飞秒激光逐线法在多模光纤的纤芯中成功制备了并联集成光纤光栅, 其反射光谱如图2(b)所示.

3 光纤光栅弯曲响应测试

如图3所示, 我们测试了上述并联集成光纤光栅阵列向不同方位弯曲时反射波长对弯曲的响应特性. 将一对光纤旋转夹具安装在一对三维位移平台上, 光纤光栅两端的尾纤被固定在旋转夹具的轴线上. 通过改变两个三维位移平台之间的间距就可以改变光纤光栅的弯曲曲率. 通过旋转夹具使光纤两端绕光纤轴线同步旋转就可以改变光纤光栅的弯曲方位. 为了测试光纤光栅向不同方位弯曲时反射波长对弯曲的响应, 如图2(a)所示, 我们设定FBG₁所在的方位为0°方位. 首先, 我们向0°方位弯曲该并联集成光纤光栅并逐步增加弯曲曲率, 通过光谱仪观察每个光纤光栅(FBG₁,

图2 (网络版彩图) (a) 并联集成光纤光栅在多模光纤纤芯横截面上的分布; (b) 并联集成光纤光栅的反射光谱

Figure 2 (Color online) (a) Schematic diagram of the cross-sectional distribution of PI-FBGs in the multimode fiber core; (b) reflection spectra of PI-FBGs

图3 (网络版彩图) 并联集成光纤光栅的矢量弯曲特性测试系统. (a) 示意图; (b) 实物图

Figure 3 (Color online) Vector bending characteristic measurement system of PI-FBGs. (a) Schematic diagram; (b) photograph.

FBG₂, FBG₃和FBG₄)的反射波长随弯曲曲率的变化. 然后向15°方位弯曲光纤光栅并逐步增加弯曲曲率, 再次通过光谱仪观察每个光纤光栅的反射波长随弯曲曲率的变化. 以此类推, 每隔15°方位就测试一次光纤光栅反射波长对弯曲的响应, 直到测试光纤光栅向345°方位弯曲时的弯曲响应.

图4显示了并联集成光纤光栅向不同方位弯曲时, 每个光纤光栅(FBG₁, FBG₂, FBG₃和FBG₄)的反射波长随弯曲曲率的变化. 实验表明, 当弯曲曲率不太大时, 反射波长的变化和弯曲曲率的增加表现出近似线性的关系. 图4表明, 光纤光栅向不同方位弯曲时, 其弯曲灵敏度不同, 即光纤光栅的弯曲灵敏度具有较强的弯曲方向相关性. 例如, 光纤光栅FBG₁和FBG₃向0°方位弯曲时, 其弯曲灵敏度分别约为20和-20 pm/m^{-1} , 然而, FBG₂和FBG₄向0°方位弯曲时的弯曲灵敏度几乎为0 pm/m^{-1} .

为了进一步表明光纤光栅弯曲灵敏度的弯曲方向相关性, 我们把每个光纤光栅(FBG₁, FBG₂, FBG₃和FBG₄)的反射波长漂移随弯曲方位 θ 的变化显示在图5中. 从图5(a)和(c)可以看出, 在恒定的弯曲曲率下, 光

图4 (网络版彩图)并联集成光纤光栅阵列的每个光纤光栅FBG₁ (a), FBG₂ (b), FBG₃ (c)和FBG₄ (d)向不同弯曲方位(0°, 15°, 30°, …, 345°)弯曲时反射波长随弯曲曲率的变化

Figure 4 (Color online) Reflection wavelength shift with bending curvature while each fiber grating, FBG₁ (a), FBG₂ (b), FBG₃ (c) and FBG₄ (d), of PI-FBGs array is bent to different directions (0°, 15°, 30°, …, 345°).

纤光栅FBG₁和FBG₃的反射波长漂移随弯曲方向的变化呈现近似余弦函数关系. 相反, 如图5(b)和(d)所示, 在恒定的弯曲曲率下, 光纤光栅FBG₂和FBG₄的反射波长漂移随弯曲方向的变化呈现近似正弦函数关系.

4 光纤光栅矢量弯曲传感机理

如图5所示, 该并联集成光纤光栅的反射波长的弯曲响应特性具有明显的弯曲方向相关性. 因此, 利用两个相互正交分布的光栅(如FBG₁和FBG₂)可以实现矢量弯曲传感. 如图6(a)所示, 弯曲曲率矢量 $\mathbf{R}$ 可以正交分解为 $\mathbf{R}_x$ 和 $\mathbf{R}_y$. 根据图4和5的实验结果, 我们计算了每个光纤光栅向不同方位弯曲时反射波长的弯曲灵敏度. 如图6(b)所示, FBG₁和FBG₂的反射波长的弯曲灵敏度与弯曲方位角的变化呈现近似余弦和正弦的关系. 当被测物体向 θ 方位弯曲时, 通过光谱仪可以观察到FBG₁和FBG₂的波长漂移分别为 $\Delta\lambda_{\text{FBG1}}$ 和 $\Delta\lambda_{\text{FBG2}}$. 则被测物体的弯曲曲率矢量 $\mathbf{R}_x$ 和 $\mathbf{R}_y$ 可表示为^[20]

$$\mathbf{R}_x = \frac{\Delta\lambda_{\text{FBG1}}}{\mathbf{K}_{\text{FBG1}}}, \quad (1)$$

$$\mathbf{R}_y = \frac{\Delta\lambda_{\text{FBG2}}}{\mathbf{K}_{\text{FBG2}}}, \quad (2)$$

式中, $\mathbf{K}_{\text{FBG1}}$ 为FBG₁向0°方位(即+y方向)弯曲时的反射波长弯曲灵敏度, $\mathbf{K}_{\text{FBG2}}$ 为FBG₂向90°方位(即+x方向)弯曲时的反射波长弯曲灵敏度. 因此, 被测物体的弯曲曲率 R 和弯曲方位角 θ 分别为

$$R = \sqrt{(\mathbf{R}_x)^2 + (\mathbf{R}_y)^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta\lambda_{\text{FBG1}}}{\mathbf{K}_{\text{FBG1}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\lambda_{\text{FBG2}}}{\mathbf{K}_{\text{FBG2}}}\right)^2}, \quad (3)$$

$$\theta = \arctan\left(\left|\frac{\mathbf{R}_x}{\mathbf{R}_y}\right|\right). \quad (4)$$

由此可见, 利用两个相互正交分布的FBG₁和FBG₂不仅可以实现弯曲曲率的测量, 而且可以判别弯曲方位.

光纤光栅弯曲传感过程中不可避免地会受到外界环境温度的影响, 即温度变化也可能导致反射波长漂

图 5 (网络版彩图)在恒定弯曲曲率下, 并联集成光纤光栅阵列的每个光纤光栅FBG₁ (a), FBG₂ (b), FBG₃ (c)和FBG₄ (d)的反射波长漂移随弯曲方位 θ 的变化. 图中显示了在5个恒定的弯曲曲率, 即2.5, 5.4, 9.7, 15.7和24.3 m^{-1} 时, 光栅反射波长随弯曲方位的变化

Figure 5 (Color online) Reflection wavelength shift with different bending directions, θ , while each fiber grating, FBG₁ (a), FBG₂ (b), FBG₃ (c) and FBG₄ (d), of PI-FBGs array bears a constant bending curvature. The figure shows the reflection wavelength shift of PI-FBGs with different bending directions corresponding to the five constant bending curvatures of 2.5, 5.4, 9.7, 15.7 and 24.3 m^{-1} .

图 6 (网络版彩图) (a)光纤光栅FBG₁和FBG₂的弯曲矢量示意图; (b)反射波长弯曲灵敏度与弯曲方位 θ 的关系

Figure 6 (Color online) (a) Schematic diagram of bending vector of FBG₁ and FBG₂; (b) bending sensitivity of reflection wavelength vs. bending direction θ .

移. 因此, 在实际的光纤光栅弯曲传感中, 光纤光栅FBG₁, FBG₂, FBG₃和FBG₄的反射波长漂移可表示为

$$\Delta\lambda_{\text{FBG1}} = \mathbf{K}_{\text{FBG1}} \cdot \mathbf{R}_{\text{FBG1}} + K_{T_1} \cdot \Delta T, \quad (5)$$

$$\Delta\lambda_{\text{FBG2}} = \mathbf{K}_{\text{FBG2}} \cdot \mathbf{R}_{\text{FBG2}} + K_{T_2} \cdot \Delta T, \quad (6)$$

$$\Delta\lambda_{\text{FBG3}} = \mathbf{K}_{\text{FBG3}} \cdot \mathbf{R}_{\text{FBG3}} + K_{T_3} \cdot \Delta T, \quad (7)$$

$$\Delta\lambda_{\text{FBG4}} = \mathbf{K}_{\text{FBG4}} \cdot \mathbf{R}_{\text{FBG4}} + K_{T_4} \cdot \Delta T, \quad (8)$$

式中, ΔT 表示外界环境的温度变化; $\mathbf{K}_{\text{FBG1}}$, $\mathbf{K}_{\text{FBG2}}$, $\mathbf{K}_{\text{FBG3}}$ 和 $\mathbf{K}_{\text{FBG4}}$ 分别表示FBG₁, FBG₂, FBG₃和FBG₄的弯曲灵敏度; $\mathbf{R}_{\text{FBG1}}$, $\mathbf{R}_{\text{FBG2}}$, $\mathbf{R}_{\text{FBG3}}$ 和 $\mathbf{R}_{\text{FBG4}}$ 分别表示以上四个光纤光栅的弯曲曲率; K_{T_1} , K_{T_2} , K_{T_3} 和 K_{T_4} 分别表示以上四个光纤光栅的温度灵敏度.

从图4和5中可以看出, 由于FBG₁和FBG₃, FBG₂和FBG₄在光纤横截面上呈几何对称分布, 因此FBG₁和FBG₃以及FBG₂和FBG₄的反射波长的弯曲响应几乎相反. 为了提高该光纤光栅传感器的弯曲测量精度和判别方位的分辨率, 我们对该并联集成光纤光栅的反射波长变化做差分运算, 即

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_{\text{FBG13}} &= \Delta\lambda_{\text{FBG1}} - \Delta\lambda_{\text{FBG3}} \\ &= \mathbf{K}_{\text{FBG1}} \cdot \mathbf{R}_{\text{FBG1}} - \mathbf{K}_{\text{FBG3}} \cdot \mathbf{R}_{\text{FBG1}} \\ &\quad + (K_{T_1} - K_{T_3}) \cdot \Delta T,\end{aligned}\quad (9)$$

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_{\text{FBG24}} &= \Delta\lambda_{\text{FBG2}} - \Delta\lambda_{\text{FBG4}} \\ &= \mathbf{K}_{\text{FBG2}} \cdot \mathbf{R}_{\text{FBG2}} - \mathbf{K}_{\text{FBG4}} \cdot \mathbf{R}_{\text{FBG4}} \\ &\quad + (K_{T_2} - K_{T_4}) \cdot \Delta T.\end{aligned}\quad (10)$$

由于FBG₁, FBG₂, FBG₃和FBG₄被制备在同一光纤中, 因此其温度灵敏度几乎相同, 即 $K_{T_1} \approx K_{T_3}$ 和 $K_{T_2} \approx K_{T_4}$. 则式(9)和(10)可以表示为

$$\Delta\lambda_{\text{FBG13}} \approx \mathbf{K}_{\text{FBG1}} \cdot \mathbf{R}_{\text{FBG1}} - \mathbf{K}_{\text{FBG3}} \cdot \mathbf{R}_{\text{FBG3}}, \quad (11)$$

$$\Delta\lambda_{\text{FBG24}} \approx \mathbf{K}_{\text{FBG2}} \cdot \mathbf{R}_{\text{FBG2}} - \mathbf{K}_{\text{FBG4}} \cdot \mathbf{R}_{\text{FBG4}}. \quad (12)$$

由于FBG₁和FBG₃以及FBG₂和FBG₄在光纤横截面上呈几何对称分布, 因此FBG₁和FBG₃以及FBG₂和FBG₄的反射波长的弯曲灵敏度数值几乎相等, 即 $|\mathbf{K}_{\text{FBG1}}| \approx |\mathbf{K}_{\text{FBG3}}|$ 和 $|\mathbf{K}_{\text{FBG2}}| \approx |\mathbf{K}_{\text{FBG4}}|$, 但是符号相反; 其弯曲曲率的数值也几乎相同, 即 $|\mathbf{R}_{\text{FBG1}}| \approx |\mathbf{R}_{\text{FBG3}}|$ 和 $|\mathbf{R}_{\text{FBG2}}| \approx |\mathbf{R}_{\text{FBG4}}|$, 并且符号相同. 因此, 式(11)和(12)可以表示为

$$\Delta\lambda_{\text{FBG13}} \approx 2|\mathbf{K}_{\text{FBG1}}| \cdot |\mathbf{R}_{\text{FBG1}}|, \quad (13)$$

$$\Delta\lambda_{\text{FBG24}} \approx 2|\mathbf{K}_{\text{FBG2}}| \cdot |\mathbf{R}_{\text{FBG2}}|. \quad (14)$$

由此可见, 可以将FBG₁和FBG₃等效为一个分布在y轴上的光纤光栅FBG₁₃, 将FBG₂和FBG₄等效为一个分布在x轴上的光纤光栅FBG₂₄. 当被测物体弯曲时, 等效光纤光栅FBG₁₃和FBG₂₄的反射波长漂移相对于单个FBG增加了几乎一倍. 因此, 等效光纤光栅FBG₁₃和FBG₂₄的弯曲灵敏度也分别比FBG₁(FBG₃)和FBG₂(FBG₄)的灵敏度增加了几乎一倍, 即 $|\mathbf{K}_{\text{FBG13}}| \approx 2|\mathbf{K}_{\text{FBG1}}|$ 和 $|\mathbf{K}_{\text{FBG24}}| \approx 2|\mathbf{K}_{\text{FBG2}}|$. 于是, 被测物体的弯曲曲率矢量 $\mathbf{R}'_x$ 和 $\mathbf{R}'_y$ 可表示为

$$\mathbf{R}'_x = \frac{\Delta\lambda_{\text{FBG13}}}{|\mathbf{K}_{\text{FBG13}}|} \approx \frac{\Delta\lambda_{\text{FBG13}}}{2|\mathbf{K}_{\text{FBG1}}|}, \quad (15)$$

$$\mathbf{R}'_y = \frac{\Delta\lambda_{\text{FBG24}}}{|\mathbf{K}_{\text{FBG24}}|} \approx \frac{\Delta\lambda_{\text{FBG24}}}{2|\mathbf{K}_{\text{FBG2}}|}. \quad (16)$$

所以, 被测物体的弯曲曲率 R' 和弯曲方位角 θ 分别为

$$R' = \sqrt{|\mathbf{R}'_x|^2 + |\mathbf{R}'_y|^2} \approx \sqrt{\left(\frac{\Delta\lambda_{\text{FBG13}}}{2|\mathbf{K}_{\text{FBG1}}|}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\lambda_{\text{FBG24}}}{2|\mathbf{K}_{\text{FBG2}}|}\right)^2}, \quad (17)$$

$$\theta = \arctan\left(\left|\frac{\mathbf{R}'_x}{\mathbf{R}'_y}\right|\right). \quad (18)$$

由式(11)和(12)可知, 我们对并联集成光纤光栅阵列的FBG₁和FBG₃以及FBG₂和FBG₄的谐振波长变化做差分运算, 使得等效光纤光栅FBG₁₃和FBG₂₄的谐振波长变化 $\Delta\lambda_{\text{FBG13}}$ 和 $\Delta\lambda_{\text{FBG24}}$ 与外界环境温度无关. 因此, 由式(17)和(18)可知, 我们引入等效光纤光栅的解调方法不仅克服了温度和弯曲之间的交叉敏感问题, 并且使传感器的弯曲灵敏度提高了几乎一倍, 从而极大地提高了弯曲测量的分辨率.

5 结论

本文中, 我们利用飞秒激光逐线法在多模光纤纤芯中制备了一种并联集成光纤光栅的矢量弯曲传感器. 该传感器可以实现任意方位的弯曲矢量传感, 即不仅可以实现弯曲曲率的测量, 而且可以判别弯曲方位. 通过引入等效光纤光栅的解调方法克服了温度和弯曲之间的交叉敏感问题, 同时将传感器的弯曲灵敏度提高了几乎一倍, 即该传感器的弯曲测量分辨率也得到了提高. 因此, 我们制备的并联集成光纤光栅矢量弯曲传感器具有结构简单和解调方便等优点, 有望实现智能工程结构弯曲曲率和弯曲方向的实时监测.

参考文献

- 1 Zhang S, Zhang W, Gao S, et al. Fiber-optic bending vector sensor based on Mach-Zehnder interferometer exploiting lateral-offset and up-taper. *Opt Lett*, 2012, 37: 4480–4482
- 2 Zhang L, Zhang W, Chen L, et al. A fiber bending vector sensor based on M-Z interferometer exploiting two hump-shaped tapers. *IEEE Photon Technol Lett*, 2015, 27: 1240–1243
- 3 Zhang J, Zhang W, Zhang Y, et al. Bending vector sensor based on Mach-Zehnder interferometer using S type fibre taper and lateral-offset. *J*

[Modern Opt](#), 2016, 63: 2146–2150

- 4 Wang X, Chen D, Li H, et al. In-line mach-zehnder interferometric sensor based on a seven-core optical fiber. [IEEE Sens J](#), 2017, 17: 100–104
- 5 Villatoro J, Minkovich V P, Zubia J. Photonic crystal fiber interferometric vector bending sensor. [Opt Lett](#), 2015, 40: 3113–3116
- 6 Villatoro J, Van Newkirk A, Antonio-Lopez E, et al. Ultrasensitive vector bending sensor based on multicore optical fiber. [Opt Lett](#), 2016, 41: 832–835
- 7 Wang S, Zhang W, Chen L, et al. Bending vector sensor based on the multimode-2-core-multimode fiber structure. [IEEE Photon Technol Lett](#), 2016, 28: 2066–2069
- 8 Wang S, Zhang Y, Zhang W, et al. Two-dimensional bending vector sensor based on the multimode-3-core-multimode fiber structure. [IEEE Photon Technol Lett](#), 2017, 29: 822–825
- 9 Frazão O, Viegas J, Caldas P, et al. All-fiber Mach-Zehnder curvature sensor based on multimode interference combined with a long-period grating. [Opt Lett](#), 2007, 32: 3074–3076
- 10 Jin Y, Chan C, Dong X, et al. Temperature-independent bending sensor with tilted fiber Bragg grating interacting with multimode fiber. [Optics Commun](#), 2009, 282: 3905–3907
- 11 Zhou W, Zhou Y, Dong X, et al. Fiber-optic curvature sensor based on cladding-mode Bragg grating excited by fiber multimode interferometer. [IEEE Photonics J](#), 2012, 4: 1051–1057
- 12 Zhao D, Chen X, Zhou K, et al. Bend sensors with direction recognition based on long-period gratings written in D-shaped fiber. [Appl Opt](#), 2004, 43: 5425–5428
- 13 Wang Y, Rao Y. A novel long period fiber grating sensor measuring curvature and determining bend-direction simultaneously. [IEEE Sens J](#), 2005, 5: 839–843
- 14 Geng P, Zhang W, Gao S, et al. Two-dimensional bending vector sensing based on spatial cascaded orthogonal long period fiber. [Opt Express](#), 2012, 20: 28557–28562
- 15 Saffari P, Allsop T, Adebayo A, et al. Long period grating in multicore optical fiber: An ultra-sensitive vector bending sensor for low curvatures. [Opt Lett](#), 2014, 39: 3058–3511
- 16 Shao L, Xiong L, Chen C, et al. Directional bend sensor based on re-grown tilted fiber bragg grating. [J Lightwave Technol](#), 2010, 28: 2681–2687
- 17 Feng D, Zhou W, Qiao X, et al. Compact optical fiber 3D shape sensor based on a pair of orthogonal tilted fiber Bragg gratings. [Sci Rep](#), 2015, 5: 17415
- 18 Osório J H, Oliveira R, Aristilde S, et al. Bragg gratings in surface-core fibers: Refractive index and directional curvature sensing. [Optical Fiber Tech](#), 2017, 34: 86–90
- 19 Yang K, He J, Liao C, et al. Femtosecond laser inscription of fiber bragg grating in twin-core few-mode fiber for directional bend sensing. [J Lightwave Technol](#), 2017, 35: 4670–4676
- 20 Hou M, Yang K, He J, et al. Two-dimensional vector bending sensor based on seven-core fiber Bragg gratings. [Opt Express](#), 2018, 26: 23770–23781
- 21 Gander M J, MacPherson W N, McBride R, et al. Bend measurement using Bragg gratings in multicore fibre. [Electron Lett](#), 2000, 36: 120–121
- 22 Wang Y, Li Z, Liu S, et al. Parallel-integrated fiber bragg gratings inscribed by femtosecond laser point-by-point technology. [J Lightwave Technol](#), 2019, 37: 2185–2193

Temperature-insensitive vector bending sensor based on parallel-integrated fiber Bragg gratings

SHAO LaiPeng^{1,2}, BAO WeiJia^{1,2}, LIU Shen^{1,2}, DU Bin^{1,2}, YANG KaiMing^{1,2}, FU CaiLing^{1,2}, LIU XueYa^{1,2}, LI ZhengYong^{1,2} & WANG YiPing^{1,2}

¹ Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education/Guangdong Province, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

² Shenzhen Key Laboratory of Photonic Devices and Sensing Systems for Internet of Things, Guangdong and Hong Kong Joint Research Centre for Optical Fibre Sensors, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

Parallel-integrated fiber Bragg grating (PI-FBG) arrays use a femtosecond laser line-by-line method. Each FBG in the fiber grating array is fabricated at the same position along the axial direction of a multimode fiber core but at different radial directions. The PI-FBG array can be used to realize a temperature-insensitive vector bending sensor. Such a sensor can not only measure bending curvature but also determine any bending direction. By introducing the demodulation method of equivalent fiber grating, that is, the difference operation of the FBG reflection wavelength changes, the cross-sensitivity problem between the bending and the temperature is overcome, and the bending sensitivity of the sensor is almost doubled; thus, the resolution of the bending sensor is remarkably improved. Therefore, the vector bending sensor can achieve the real-time monitoring of the bending curvature and bending direction of an intelligent engineering structure.

optics fiber sensors, fiber Bragg gratings, bending sensors, vector sensors, femtosecond lasers

doi: [10.1360/SST-2020-0276](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0276)