光电技术及应用

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20250316002

基于光纤光栅的指尖三维力触觉传感器在裂缝检测中的应用

徐 航，刘 艳*，许 静，王 冰，庞乐之

（北京交通大学 电子信息工程学院，北京 100044）

摘 要： 提出一种基于光纤布拉格光栅（fiber Bragg grating，FBG）的新型指尖三维力触觉传感器，并将其应用于裂缝检测。该传感器采用四个FBG，结合凹槽和细梁结构，优化了对轴向力和横向力的测量灵敏度，同时简化了解耦过程。通过力学仿真，分析传感器在不同力作用下的形变特性，并构建三维力感知模型。实验结果表明，传感器在X，Y和Z三个方向的灵敏度分别为1 680.45，1 441.28和125.36 pm/N，具备良好的三维力检测能力。在动态实验中，传感器测得的三维分力与理论值高度吻合，合力最大相对误差仅为4.40%。在裂缝检测实验中，表现出良好的裂缝宽度检测能力和受力检测能力，检测宽度的最大相对误差不超过4%。该传感器具有结构简单、解耦方式简便、灵敏度高的特点，可为机器人在复杂环境中的裂缝检测和修复任务提供支持。

关键词： 光纤布拉格光栅；裂缝检测；三维力传感器；有限元仿真；力感知模型

中图分类号： TN253；O43 **文章编号：** 1001－5868(2025)03－0528－08

Application of Fingertip 3D Force Tactile Sensor in Crack Detection Based on Fiber Bragg Gratings

XU Hang, LIU Yan, XU Jing, WANG Bing, PANG Lezhi

(**School of Electronic Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, CHN**)

Abstract: A novel fingertip three-dimensional (3D) force tactile sensor based on fiber Bragg grating is proposed and applied to crack detection. The sensor employs four FBGs combined with a sensitization structure, which optimizes the measurement sensitivity to axial and lateral forces while simplifying the decoupling process. The deformation characteristics under different forces were analyzed using a mechanical simulation, and a 3D force sensing model was constructed. The experimental results show that the sensitivities of the sensor in the X, Y, and Z directions are 1 680.45, 1 441.28, and 125.36 pm/N, respectively, which indicates the ability for 3D detection. In a dynamic experiment, the 3D partial force measured using the sensor is highly consistent with the theoretical value, and the maximum relative error of the combined force is only 4.40%. In the crack detection experiment, it exhibits good crack width detection and force monitoring abilities, and the maximum relative error of the detection width is less than 4%. The sensor is characterized by simple structure, easy decoupling method, and high sensitivity, which is highly applicable to crack detection and the repair tasks of robots in complex environments.

Key words: fiber Bragg grating; crack detection; three-dimensional force sensor; finite element simulation; force sensing model

收稿日期：2025－03－16.

基金项目：国家自然科学基金项目（61975009）.

* **通信作者：**刘 艳

0　引言

在机器人与环境的远程物理交互中，一项重要的任务是对容器、管道或其他表面进行裂缝检测，未被发现的裂缝可能会导致重大故障。因此，如何快速、准确地对环境进行特征描述，同时敏锐感知外力，成为机器人在远程物理交互中面临的重要挑战[1-2]。目前，对于裂缝等远程环境信息的收集，大多依赖视觉信息[3-4]。Chen等[5]提出一种融合卷积神经网络和朴素贝叶斯算法的方法来分析检测核反应堆裂纹的视频帧，在每帧0.1次误报的情况下获得98.3%的命中率。Iliopoulos等[6]应用数字图像相关技术和超声脉冲速度技术分析了混凝土结构裂缝的演化，实现对裂缝开始的时间、位置、宽度以及深度的检测。但在光照条件有限的环境中，仅有视觉信息是不够的[7-8]，引入触摸反馈就变得非常重要。而对于空间力的远程测量和反馈，应用较多的传感器类型为电学传感器，包括电容式[9]、电阻式[10]、压电式[11]等，此类传感器敏感元件为有源器件，抗电磁干扰能力差，容易受到外部环境影响。

光纤传感技术具有体积小、灵敏度高、抗电磁干扰等优点，已被广泛应用在土木工程、机械制造等领域[12-13]。基于光纤布拉格光栅（fiber Bragg grating，FBG）的光纤传感技术凭借其小巧轻便的特点[14-15]，更易于集成到机器人的结构中，不会显著增加机器人的负载或影响其运动灵活性。此外，FBG传感器的复用能力，可在同一根光纤上沿不同位置同时测量多个参数，为机器人提供更全面的信息[16-18]。研究者对基于FBG的三维力传感提出了很多方案，Wu等[19]通过在锥形衬底的侧面配置三个FBG传感器，研制了一种用于机械支气管镜检查的力传感器，采用基于交叉验证支持向量机和高斯核函数的非线性解调方法，在X，Y和Z轴上分别获得了10.58，14.57和26.32 mN的解调精度；文献[20]采用刻有FBG的多芯光纤，设计了一种可定制的螺旋压缩弹簧作为挠性结构，具有7.4 mN的纵向分辨率、0.8 mN的横向分辨率；2023年，Wang等[21]设计了一种带有中心通道的三维力传感器，由轴向力感知区和径向力感知区组成，采用四根双光纤FBG，并基于欧拉-伯努利梁理论建立了新型的三维力感知模型。使用多芯光纤或较多的FBG可以实现高灵敏度和高精确度的测量，但会导致测量数据量增加，计算和解耦的难度也随之增加。

为实现裂缝检测，同时进一步获得更丰富的接触力信息，提出一种基于光纤光栅的新型指尖三维力触觉传感器。选择比较软的硅胶作为制作材料，传感器上布置四根光栅，实现对三维力和温度的传感，小型的指尖结构利用凹槽结构和细梁结构提升了对轴向力和横向力的测量灵敏度，且易于制作、解耦方式简单。首先基于结构的受力仿真，理论推导了力与光栅变形的关系。然后，基于标定实验，确定了光栅波长偏移与力和温度的关系矩阵，并验证了传感器对空间力的传感能力。最后，通过裂缝识别实验，验证了该传感器对平面裂缝宽度的测量能力。

1　传感器原理与结构

1.1　FBG传感原理

在所设计的三维力触觉传感器中，传感的核心元件是FBG，其纤芯折射率在光纤轴向上呈现周期性分布，本质是一个窄带滤波器，只有满足光栅布拉格谐振条件的光可以被有效反射。FBG的反射波长与折射率周期的关系可以表示为：

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{1}$$

式中，λ_B为反射光的中心波长值，n_{eff}为光纤的有效折射率，Λ为光栅的调制周期。

通过公式（1）可知，λ_B受有效折射率和周期的共同影响。当光纤发生应变或受到温度影响时，λ_B就会发生变化。中心波长漂移、环境温度和FBG应变之间的关系为：

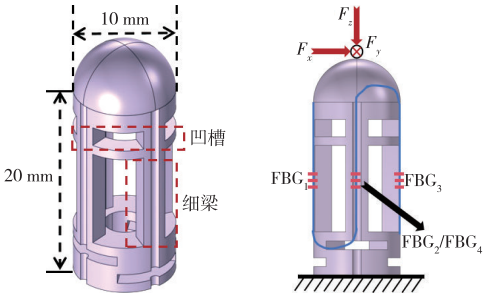
$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1-P_e)\varepsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_T)\Delta T \tag{2}$$

式中，$\Delta\lambda_B$为中心波长漂移，ε为FBG的应变，P_e为光应变系数，α_Λ是为热膨胀系数，ΔT为温度变化，α_T为热光系数。

1.2　传感器的设计与力学仿真

图1所示为实验采用的FBG传感器结构图。该指尖传感器整体模拟指尖的大小和形状，具有半球顶和圆柱结构，内部中空。对于中空圆柱体部分，设计凹槽结构减小轴向刚度，以增加传感器对轴向力F_z的传感灵敏度，同时设计细梁结构，以增加传感器对横向力F_x，F_y的灵敏度。传感器结构具体几何参数如图1（a）。四根细梁高为10 mm，每根细梁上均开有1 mm宽的凹槽，用以布置光纤。如图1（b）所示，四根FBG串联在一根光纤上，以90°间隔分布排列在四根梁上。为更好地实现裂缝检测

和力检测，使用较软的硅胶作为材料，传感器组成部件的物理参数如表1所示。



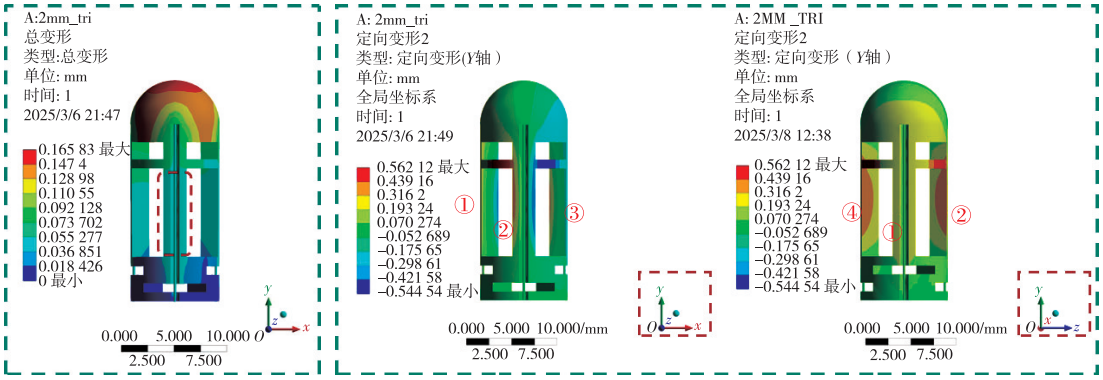
（a）结构示意图 （b）施加外力与光栅布置情况

图1 传感器模型示意图

确认传感器结构的设计后，利用Ansys-Workbench对结构进行受力仿真。对传感器垂直向下施加大小为1 N的力F_z，结构变形情况如图2(a)，四根细梁上均产生较大的形变，且每根梁均为压缩状态。间隔180°的两根梁形变相同，相邻两根梁形变的微小差异是传感器下方凹槽不完全对称所致。当对传感器施加横向力时，如图2(b)，以施加F_x为例，①号细梁形变为正，③号梁形变为负，即①号梁沿X轴被拉伸，③号梁沿X轴被压缩；②号梁和与之对称的④号梁处于与中轴线平行的中间位置，细梁中心处轴向形变为0，对应光栅应变也为0。

表1 传感器组成部件物理参数

组成部件	材料	物理参数		
		弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg/m^3)
光纤	二氧化硅	73	0.17	2 203
弹性体	硅胶	0.001 8	0.48	1.3



（a）施加轴向力的仿真结果 （b）施加横向力的仿真结果

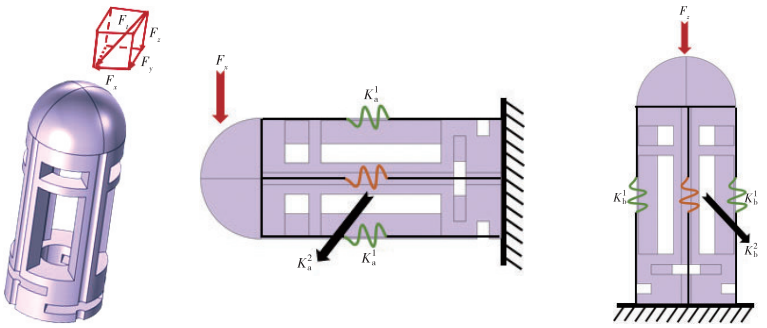
图2 对传感器施加不同方向力的仿真示意图

2 三维力感知模型的构建

根据受力仿真结果，分析传感器受三维力的情况。如图3所示，指尖传感器在施加外力的情况下会发生变形，四个FBG因此出现的波长漂移与外力/温度的映射关系可以表示为：

$$\begin{bmatrix}\Delta\lambda_{B1}\\ \Delta\lambda_{B2}\\ \Delta\lambda_{B3}\\ \Delta\lambda_{B4}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}C_1^1 & C_1^2 & C_1^3 & C_1^4\\ C_2^1 & C_2^2 & C_2^3 & C_2^4\\ C_3^1 & C_3^2 & C_3^3 & C_3^4\\ C_4^1 & C_4^2 & C_4^3 & C_4^4\end{bmatrix}\begin{bmatrix}F_x\\ F_y\\ F_z\\ \Delta T\end{bmatrix} \tag{3}$$

$C_n^m(m,n=1,2,3,4)$为FBG反射波长偏移与力/温度之间的灵敏度系数矩阵。



（a）模拟实物传感器受力情况 （b）传感器仅在横向力作用下进行力传感的原理图 （c）传感器仅在轴向力作用下进行力传感的原理图

图3 三维力传感原理图

根据所设计的传感器的特点，可将传感器结构简化为弹簧，如图3所示，底部为固定端，空间力施加在传感探头顶部。根据仿真结果，如图2(b)所示，当施加横向力F_x时，FBG_1和FBG_3分别被压缩或拉伸，此时FBG_2和FBG_4位于中性轴，不发生轴向形变。同理，在施加横向力F_y时，FBG_1和FBG_3位于中性轴，FBG_2和FBG_4发生轴向形变。因此，$FBG_{1\text{-}4}$在横向力作用下的弯曲变形计算式为：

$$\begin{aligned}\Delta x_{B1}^1&=\left(\frac{d_f}{2}\right)\cdot F_x\cdot d_c\Big/K_a^1\\ \Delta x_{B2}^1&=\left(\frac{d_f}{2}\right)\cdot F_y\cdot d_c\Big/K_a^2\\ \Delta x_{B3}^1&=-\left(\frac{d_f}{2}\right)\cdot F_x\cdot d_c\Big/K_a^1\\ \Delta x_{B4}^1&=-\left(\frac{d_f}{2}\right)\cdot F_y\cdot d_c\Big/K_a^2\end{aligned}\tag{4}$$

式中，Δx_{Bi}^1为FBG_i(i=1,2,3,4)在横向力作用下的轴向变形，d_f为光纤直径，d_c为施力点到光纤光栅区域的距离，K_a^1和K_a^2分别为传感探头X轴位置和Y轴位置受横向力的等效弯曲刚度。

根据仿真结果，当受到轴向力时，四根光栅均会发生明显形变，如图2(a)所示，其中，间隔180°的两根光栅形变量相等。因此，四根光栅的轴向形变计算式为：

$$\begin{aligned}\Delta x_{B1}^2&=\Delta x_{B3}^2=F_z\Big/K_b^1\\ \Delta x_{B2}^2&=\Delta x_{B4}^2=F_z\Big/K_b^2\end{aligned}\tag{5}$$

式中，Δx_{Bi}^2为FBG_i(i=1,2,3,4)在轴向力作用下的轴向变形，K_b^1和K_b^2分别为传感探头X轴位置和Y轴位置受轴向力的等效弯曲刚度。

由公式(5)得到FBG_i受到的应变为：

$$\varepsilon_{Bi}=\left(\Delta x_{Bi}^1+\Delta x_{Bi}^2\right)\Big/l,\ i=1,2,3,4\tag{6}$$

式中，l为栅区长度。由公式(2)可以得到波长偏移与外力的关系，其中，四个FBG的中心波长漂移可以表示为：

$$\begin{aligned}\Delta\lambda_{Bi}&=\frac{\lambda_{Bi}\left(1-\rho_e\right)}{l}\left(\pm\frac{F_x d_f d_c}{2K_a^1}+\frac{F_z}{K_b^1}\right)+\lambda_{Bi}\left(\alpha_\Lambda+\alpha_T\right)\Delta T,\ i=1,3\\ \Delta\lambda_{Bi}&=\frac{\lambda_{Bi}\left(1-\rho_e\right)}{l}\left(\pm\frac{F_y d_f d_c}{2K_a^2}+\frac{F_z}{K_b^2}\right)+\lambda_{Bi}\left(\alpha_\Lambda+\alpha_T\right)\Delta T,\ i=2,4\end{aligned}\tag{7}$$

由公式(3)和(7)得到矩阵$\boldsymbol{C}_n^m$表达式，矩阵中第n行代表外力和温度改变时对FBG_n波长偏移的影响，第m列代表三个方向的力和温度某一个变量发生改变时，四个FBG波长的偏移情况：

$$\boldsymbol{C}_n^m=\begin{bmatrix}\dfrac{\lambda_{B1}\left(1-\rho_e\right)d_f d_c}{2K_a^1 l} & 0 & \dfrac{\lambda_{B1}\left(1-\rho_e\right)d_f d_c}{K_b^1 l} & \lambda_{B1}\left(\alpha_\Lambda+\alpha_T\right)\\ 0 & \dfrac{\lambda_{B2}\left(1-\rho_e\right)d_f d_c}{2K_a^2 l} & \dfrac{\lambda_{B2}\left(1-\rho_e\right)d_f d_c}{K_b^2 l} & \lambda_{B2}\left(\alpha_\Lambda+\alpha_T\right)\\ -\dfrac{\lambda_{B3}\left(1-\rho_e\right)d_f d_c}{2K_a^1 l} & 0 & \dfrac{\lambda_{B3}\left(1-\rho_e\right)d_f d_c}{K_b^1 l} & \lambda_{B3}\left(\alpha_\Lambda+\alpha_T\right)\\ 0 & -\dfrac{\lambda_{B4}\left(1-\rho_e\right)d_f d_c}{2K_a^2 l} & \dfrac{\lambda_{B4}\left(1-\rho_e\right)d_f d_c}{K_b^2 l} & \lambda_{B4}\left(\alpha_\Lambda+\alpha_T\right)\end{bmatrix}\tag{8}$$

3　实验与分析

3.1　力标定实验

实验装置如图4所示。标定系统由一个原型传感器、一台压力机(东莞市智取精密仪器有限公司ZQ-990B)、一个光纤光栅解调仪和微调平台构成，微调平台用于调整传感器相对于水平面的倾斜角度和XOY平面的旋转角度。所使用的FBG元件栅区长度为5 mm，反射率约90%。四个FBG的初始中心波长分别为1 529.516 7,1 539.286 6,1 549.345 2和1 559.806 6 nm。在标定实验中，F_x/F_y设置为−1～1 N，步长为0.1 N，F_z设置为0～5 N，步长为0.5 N。每个实验重复三次，取波长偏移结果的平均值来进行标定。

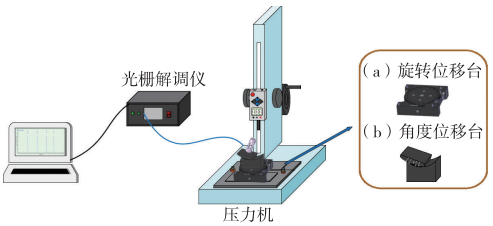
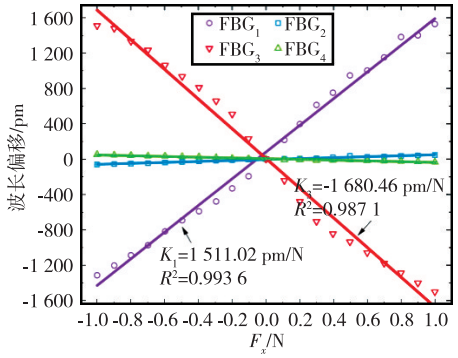
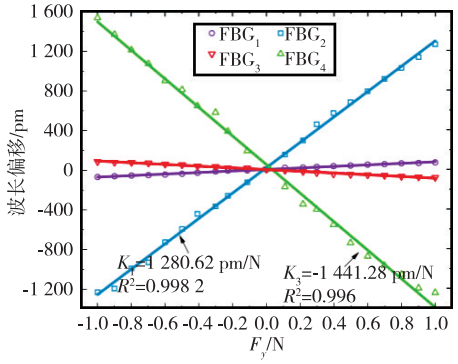


图4　标定实验装置图

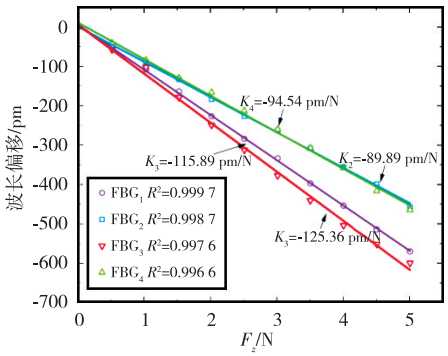
在F_x,F_y和F_z作用下的对应结果如图5所示，四根光栅在F_z的作用下被压缩，发生波长偏移，力与FBG波长呈现良好的线性关系。当施加横向力时，位置与施加力同轴的两根对称的光栅波长发生近似对称的偏移，线性度良好，与1.2小节仿真情况相符。位于中轴的两根对称光栅发生较小的波长偏移，这种误差来源于在粘接FBG的过程中，四个FBG的粘接情况不一致，且不能保证与中性面完全重合，导致实验和仿真结果存在差异。



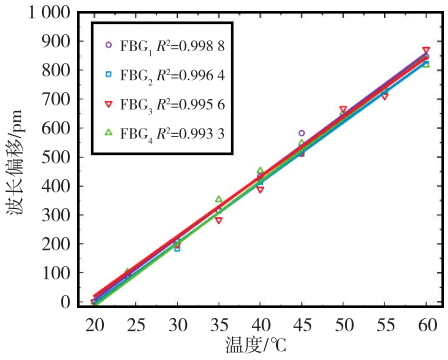
（a）F_x



（b）F_y



（c）F_z



（d）温度

图5 施加不同力和温度时的波长偏移情况

通过温控箱对传感器进行温度控制实验。将传感器置于温控箱中，在20～60 ℃的范围内控制温控箱以5 ℃的步长进行升温操作，四个FBG的波长变化在该温度范围内存在良好的线性关系，且温度灵敏度近似，分别为21.26,20.81,21.51,20.57 pm/℃，R^2分别为0.996 4,0.998 8,0.993 3,0.995 6。分析与标准FBG温度灵敏度有所偏差的原因是装配误差，以及加热时模型本身发生形变带动光栅发生形变，从而引起较大的波长偏移。由公式(8)和上述标定实验，可以确定关系矩阵$\boldsymbol{C}_n^m$：

$$\begin{bmatrix}\Delta\lambda_{B1}\\ \Delta\lambda_{B2}\\ \Delta\lambda_{B3}\\ \Delta\lambda_{B4}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1\,511.02 & 77.27 & -115.89 & 21.26\\ 54.36 & 1\,280.62 & -89.89 & 20.81\\ -1\,680.45 & -86.6 & -125.36 & 21.51\\ -42.19 & -1\,441.28 & -94.54 & 20.57\end{bmatrix}\begin{bmatrix}F_x\\ F_y\\ F_z\\ \Delta T\end{bmatrix} \tag{9}$$

根据多维力传感器灵敏度的定义，被测输入的灵敏度可以用灵敏度矩阵中各列的最大值来描述[22-23]，因此所设计的FBG传感器测量F_x,F_y和F_z的灵敏度分别为1 680.45,1 441.28和125.36 pm/N。

3.2 力传感验证实验

在恒温20 ℃的实验环境下，以三维空间力进行加载试验。将图4中的角度位移台调至30°，旋转位移台调至135°，对传感器施加动态力，此时，理论上传感器受到的F_x与F_y大小相等，轴向力大小为横向力的$\sqrt{3}$倍。如图6所示，合力F_t和三个力分量的计算值与参考力传感器的检测值之间达到了很好的一致性。其中，参考力传感器为压力机上的传感器，能够传感压力机探头与设计传感器的相互作用力。经计算，施力过程中F_t与参考力的最大相对误差为4.40%，体现了传感器对于空间三维力具备良好的检测能力，如图7所示。

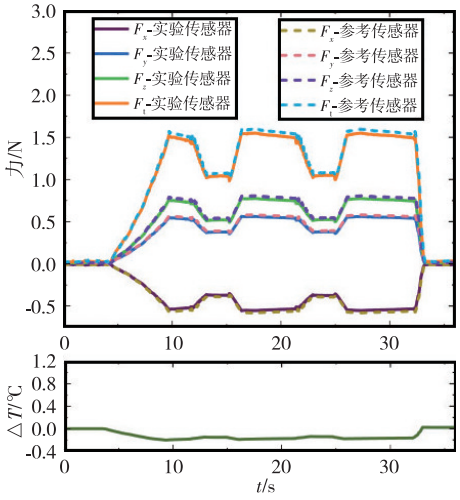


图 6　力与温度变化的传感结果

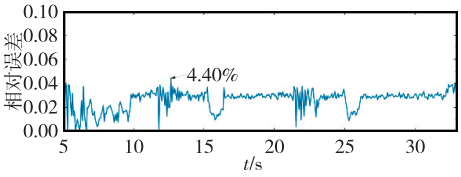


图 7　F_t参考值与测量值的相对误差曲线

3.3　裂缝识别实验

实验装置如图 8 所示。裂缝板上刻有五道裂缝，分别为 1，1，2，5 和 8 mm，将裂缝板固定在步进电机上的位移台，分别以 0.8 mm/s 的速度设置电机沿 X 轴方向运动、以 0.5 mm/s 的速度沿 Y 轴方向运动进行两次实验。用解调仪跟踪 FBG 波长偏移，并解调传感器的受力情况，结果如图 9 所示。当传感器在经过裂缝时，FBG 的状态会发生突变，波长也会随之变化，根据波长突变区域的时间判断裂缝宽度。突变时间区域确定的方法为：寻找曲线的波峰波谷点，将差值大于一定阈值的相邻波峰波谷点视为有效拐点，根据拐点并结合图像确定时间范围。滑动开始前，四个 FBG 均被压缩，即受到轴向力；滑动开始后，四个 FBG 在相同的区域内发生波长突变。当沿 X 轴运动时，如图 9(a)和(b)，FBG_1 和 FBG_3 分别发生明显的拉伸和压缩，利用 5 个突变区域时间分别计算得到相应裂缝宽度为 1.04，1.016，2.008，4.832，8.128 mm，最大相对误差为 4%，同时解调出过程中所受 F_y 接近于 0。当沿 Y 轴运动时，如图 9(c)和(d)，FBG_2 和 FBG_4 分别发生明显的拉伸和压缩，利用五个突变区域时间分别计算得到相应裂缝宽度为 0.97，1.025，1.98，4.975，7.97 mm，最大相对误差为 3%，同时解调出过程中所受 F_x 接近于 0。结果表明，传感器在不同方向上均可有效对裂缝进行识别，识别结果具有准确性。

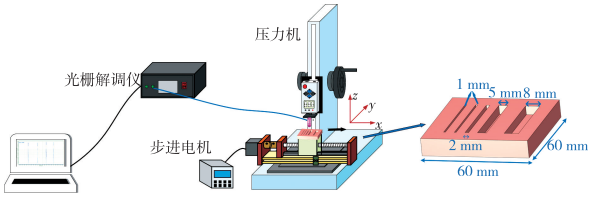
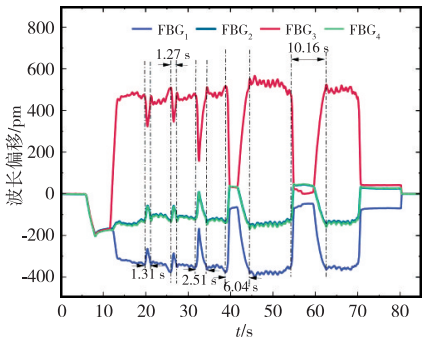
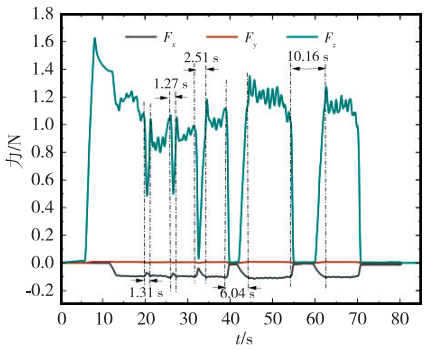


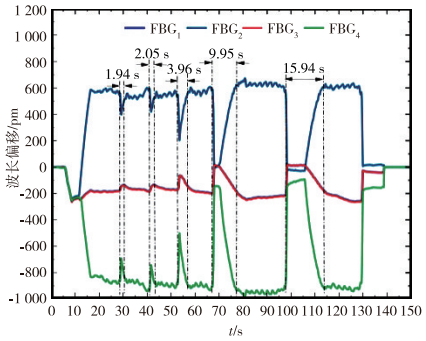
图 8　裂缝实验装置图



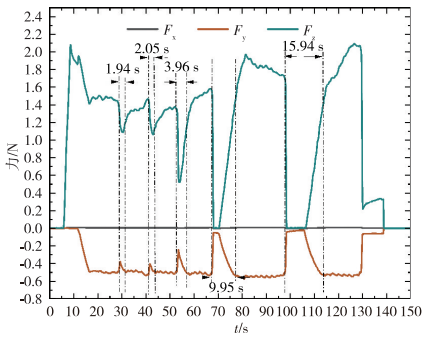
(a) 波长偏移(沿 X)



(b) 受力情况(沿 X)



(c) 波长偏移(沿 Y)



(d) 受力情况(沿 Y)

图 9　传感器划经过裂缝板时 FBG 波长偏移与受力情况

3.4 分析讨论

与其他同类型、类似作用力范围的三维力传感器相比，该传感器能够在使用较少FBG的同时获得传感灵敏度较大幅度的提高，如表2所示。当检测裂缝时，传感器能够同时感知裂缝宽度和受力情况，这种能力在复杂环境中的裂缝检测和修复任务中尤为重要，能够显著提高操作的安全性和效率。与其他裂缝检测方法相比，该传感器能提供接触式检测，并可远程应用于恶劣环境中，且检测方式简单可靠。

表2 其他力传感器使用FBG的数量和性能情况对比

不同传感器	FBG数量	X,Y,Z方向的灵敏度/(pm/N)		
		K_x	K_y	K_z
Wu等[19]	3	94.52	68.63	37.99
Al-Ahmad O等[20]	1(多芯光纤)	1 250	1 250	135.14
Wang等[21]	8	526.32	416.67	102.04
实验传感器	4	1 680	1 441	125.36

在后续工作中，可对传感器进行进一步优化，例如：(1)探索更先进的材料和结构设计，以进一步提高传感器的灵敏度和可靠性；(2)结合人工智能算法，实现裂缝检测和力感知的自动化和智能化。

4 结论

本文提出一种基于光纤布拉格光栅的指尖三维力触觉传感器。首先确定传感器的结构、几何参数、材料，并对传感器受轴向力和横向力的情况分别进行力学仿真。根据仿真结果，将传感器模拟为弹簧，对其进行力感知模型的构建。然后，制作实物传感器，通过标定实验确定波长偏移与力/温度信息的关系矩阵，并确定传感器在X，Y和Z方向的灵敏度分别为1 680.45，1 441.28和125.36 pm/N，在三个方向均具有良好的力检测能力。在空间力动态验证实验中，传感器测得的三个方向的分力均与理论值非常接近，测得合力和参考力的最大相对误差仅为4.40%，表明传感器具有良好的三维空间力检测能力。在裂缝检测实验中，传感器在X方向和Y方向均能有效检测裂缝宽度，最大相对误差不超过4%，同时监测受力的变化，判断传感器相对于裂缝的运动方向，表明该传感器对裂缝有良好的感知能力。

参考文献：

[1] Jin K, Li Z, Nan P, et al. Three-dimensional force-tactile sensors based on embedded fiber Bragg gratings in anisotropic materials[J]. Optics Letters, 2023, 48(9): 2269-2272.

[2] Palermo F, Konstantinova J, Althoefer K, et al. Implementing tactile and proximity sensing for crack detection[C]// 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2020: 632-637.

[3] Shaukat A, Gao Y, Kuo J A, et al. Visual classification of waste material for nuclear decommissioning[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2016, 75: 365-378.

[4] Sun L, Zhao C, Yan Z, et al. A novel weakly-supervised approach for RGB-D-based nuclear waste object detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(9): 3487-3500.

[5] Chen F C, Jahanshahi M R. NB-CNN: deep learning-based crack detection using convolutional neural network and Naïve Bayes data fusion [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(5): 4392-4400.

[6] Iliopoulos S, Aggelis D G, Pyl L, et al. Detection and evaluation of cracks in the concrete buffer of the Belgian Nuclear Waste container using combined NDT techniques[J]. Construction and Building Materials, 2015, 78: 369-378.

[7] Hainsworth D W. Teleoperation user interfaces for mining robotics[J]. Autonomous Robots, 2001, 11(1): 19-28.

[8] Tavakoli M, Aziminejad A, Patel R V, et al. High-fidelity bilateral teleoperation systems and the effect of multimodal haptics [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B, Cybernetics, 2007, 37(6): 1512-1528.

[9] 沃华蕾. 电容式三维力柔性触觉传感器的设计与制备[D]. 杭州：浙江大学, 2019.
Wo Hualei. Design and fabrication of capacitive flexible tactile sensor for three-dimensional force[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.

[10] Tan C, Dong Z, Li Y, et al. A high performance wearable strain sensor with advanced thermal management for motion monitoring[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 3530.

[11] Ning C, Dong K, Cheng R, et al. Flexible and stretchable fiber-shaped triboelectric nanogenerators for biomechanical monitoring and human-interactive sensing [J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(4): 2006679.

[12] 史云飞. 基于双Mach-Zehnder干涉仪的扰动定位方法研究[D]. 济南：山东大学, 2015.
Shi Yunfei. Methods of disturbance positioning based on dual Mach-Zehnder interferometer [D]. Ji' nan: Shandong University, 2015.

[13] Hong X, Wu J, Zuo C, et al. Dual Michelson interferometers for distributed vibration detection[J]. Applied Optics, 2011, 50(22): 4333-4338.

[14] Yan Z, Chen G, Xu C, et al. Design and experimental study of a sensitization structure with fiber grating sensor for nonintrusive pipeline pressure detection [J]. ISA Transactions, 2020, 101: 442-452.

[15] Hong C, Zhang Y, Su D, et al. Development of a FBG based hoop-strain sensor using 3D printing method[J]. IEEE

Access, 2019, 7: 107154-107160.

[16] Fernandez A, Berghmans F, Brichard B, et al. Multi-component force sensor based on multiplexed fibre Bragg grating strain sensors [J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12(7): 810-813.

[17] Xiong L, Guo Y, Jiang G, et al. Six-dimensional force/torque sensor based on fiber Bragg gratings with low coupling [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(5): 4079-4089.

[18] Sun S, Yu J, Pang K, et al. High-precision FBG 3-D force sensor based on spatial hierarchical sensing structure [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(5): 4833-4842.

[19] Wu Z, Gao A, Liu N, et al. FBG-based triaxial force sensor integrated with an eccentrically configured imaging probe for endoluminal optical biopsy [C]// 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2020: 1625-1631.

[20] Al-Ahmad O, Ourak M, Vlekken J, et al. Three-dimensional catheter tip force sensing using multi-core fiber Bragg gratings[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2023, 10: 1154494.

[21] Wang H, Du Z, Wang L, et al. Design of a modular 3-D force sensor with fiber Bragg gratings for continuum surgical robot [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 4004111.

[22] Polygerinos P, Seneviratne L D, Razavi R, et al. Triaxial catheter-tip force sensor for MRI-guided cardiac procedures [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(1): 386-396.

[23] Li T, King N K K, Ren H. Disposable FBG-based tridirectional force/torque sensor for aspiration instruments in neurosurgery [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(4): 3236-3247.

作者简介：

徐　航(2000—)，女，硕士研究生，主要从事光纤传感方面的研究；

刘　艳(1978—)，女，博士，教授，主要从事光纤通信、光纤传感方面的研究。