

基于光纤布拉格光栅多维力触觉传感器的研究

刘 靖

天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

收稿日期: 2024年1月15日; 录用日期: 2024年3月16日; 发布日期: 2024年3月27日

摘 要

为了帮助机器人感知与外界环境和对象的相互作用情况并及时作出判断和反馈, 研究并制作了一种基于光纤光栅测量三维力的触觉传感器, 用于机器人外表面的受力检测。该传感器主要由一个十字型弹性体和一根串联了5段不同中心波长的光栅组成。首先利用SolidWorks软件进行有限元仿真分析, 研究弹性体接受外部水平力和垂直力时各部分的应变特性, 然后依据其应变特性, 确定各个FBG在弹性体上的最佳粘接位置, 以达到最高的灵敏度; 其次, 对弹性体的不同位置施加应力, 确定最佳施加力的位置; 最后通过处理五个FBG的波长变化, 测量来自X、Y、Z方向的三维力灵敏度。通过实验测试分析, 该传感器具有良好的应力传感灵敏度。

关键词

光纤布拉格光栅, 触觉传感器, 三维力测量, 机器人

Research on Multidimensional Force Tactile Sensor Based on Fiber Bragg Grating

Jing Liu

School of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin

Received: Jan. 15th, 2024; accepted: Mar. 16th, 2024; published: Mar. 27th, 2024

Abstract

In order to assist robots in perceiving the interaction with the external environment and objects, and to make timely judgments and feedback, a tactile sensor based on fiber Bragg grating measurement of three-dimensional forces was studied and developed for force detection on the outer surface of robots. The sensor mainly consists of a cross shaped elastomer and a grating connected in series with 5 different center wavelengths. Firstly, SolidWorks software is used for finite element

simulation analysis to study the strain characteristics of each part of the elastic body when subjected to external horizontal and vertical forces. Then, based on its strain characteristics, the optimal bonding position of each FBG on the elastic body is determined to achieve the highest sensitivity; Secondly, apply stress to different positions of the elastic body to determine the optimal position for applying force; Finally, by processing the wavelength changes of five FBGs, the three-dimensional force sensitivity from the X, Y, and Z directions was measured. Through experimental testing and analysis, the sensor has good stress sensing sensitivity.

Keywords

Fiber Bragg Grating, Tactile Sensors, Three Dimensional Force Measurement, Robot

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

三维力的传感能帮助机器人感知外界环境并作出及时的反馈, 发挥着类似人体神经的作用[1]。触觉感知水平直接反映机器人的智能化水平与人机交互能力。目前, 国内外的触觉传感研究已经取得了较多的研究成果, 各类触觉传感器按原理主要可分为压阻式[2]、压电式[3]、电容式[4]和光学式[5]等形式, 但因抗电磁干扰能力较弱、缺乏柔性、响应速度慢等问题导致其难以实现高精度的触觉信息检测, 具有一定的局限性。而光纤布拉格光栅传感器具有体积小、灵敏度高、响应速度快、抗电磁干扰能力强等优点, 利用 FBG 触觉传感器可以实现对应变[6]、温度[7]等各种物理量的测量, 因此将非常适合进行机器人的触觉检测。2001 年, 比利时学者 Fernandez A 等人[8]借助 FBG 可以多路复用的特点, 将一根串联了 8 段不同中心波长的光栅布置在十字梁横梁的上下表面, 通过测量横梁上下表面的 FBG 的中心波长变化差值实现了多维力的测量。2006 年, 韩国 Heo Jin-Seok 等人[9]设计了隔膜式和桥式 2 种结构的力觉传感器阵列, 解决了光纤的微弯和啁啾效应的同时实现了温度补偿。隔膜式传感器的空间分辨率为 25 mm、力的最小敏感度达到了 0.005 N; 桥式传感器的空间分辨率为 5 mm、力的最小敏感度达到了 0.001 N, 将传感器阵列应用于外科手术套上, 可获取手术的接触力觉信号。2016 年, 中国武汉科技大学郭永兴等人[10]设计了一个基于 FBG 原理的三维力指尖传感器, 该传感器能感受沿着手指的轴向力和手指的周向力, 可测量周向力的最小精度是 0.060 N, 轴向力的最小精度是 0.045 N。

光纤光栅自身具有对称特性, 当受到不同方向的作用力时, 现象不存在明显差异, 故仅依靠单个 FBG 难以实现三维力的测量。因此, 传感单元可以借助外部结构体及多根不同中心波长的 FBG 串联实现机器人外表面的三维力检测。

2. 理论分析

光纤布拉格光栅是一种在纤芯内形成的空间相位周期性分布的光栅。当宽带光通过光纤纤芯时, 特定波长的部分会被光纤光栅反射, 其余的宽带部分则可以通过光栅到达光纤的另一端。反射光谱的中心波长定义为 λ_B , 可表示为:

$$\lambda_B = 2n_{eff} \cdot \Lambda \quad (1)$$

其中, n_{eff} 为光纤的有效折射率, Λ 为光栅的周期。

中心波长 λ_B 的位移取决于光纤有效折射率 n_{eff} 和光栅周期 Λ 的变化，而 n_{eff} 和 Λ 的变化主要受轴向应变 $\Delta\varepsilon$ 和环境温度 ΔT 的影响。布拉格波长对应变和温度的关系可以表示为：

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_f + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\varepsilon \quad (2)$$

其中， α_f 为热膨胀系数， ξ 为热光学系数， P_e 为弹光学系数。

3. 仿真与结果分析

3.1. 传感弹性体单元结构

弹性体结构主要部分由十字梁和中心圆柱体两部分组成，如图 1，十字梁通过自身的微应变使 FBG 的中心波长发生偏移来测量水平四个方向的应力，中心圆柱体为受力平台，用于接受来自外部的应力。其中，十字梁的长宽高分别为 25 mm，5 mm，2.5 mm，受力平台的直径和高度分别为 10 mm，13 mm。弹性体的 3D 打印选择弹性较高的白色树脂材料，杨氏模量 E 为 2545 Mpa，泊松比 μ 为 0.4。

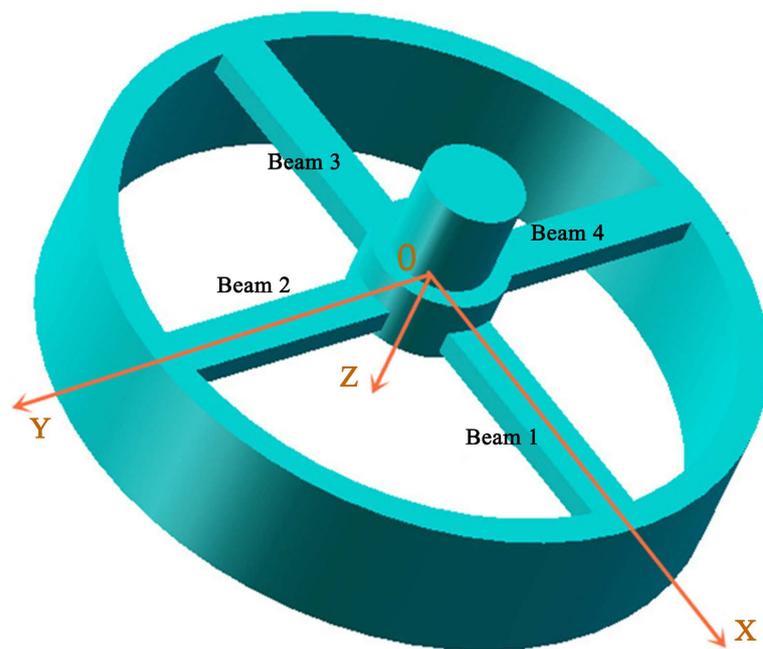


Figure 1. Cross beam elastic structure diagram

图 1. 十字梁弹性体结构图

3.2. 弹性体应变特性分析

3.2.1. 弹性体在水平力作用下的应变特性

利用 SolidWorks 对弹性体的应变特性进行分析，如图 2。对弹性体受力平台 X 方向施加大小为 10N 的水平力时，其应变特性如图 3。梁 1 和梁 3 上表面产生应变，应变量从中心向外围基本呈递减趋势，且未对梁 2 和梁 4 产生影响。对于 Y 方向施加大小为 10N 的水平力，梁 2 和梁 4 的应变特性与 X 方向同理。

3.2.2. 弹性体在竖直力作用下的应变特性

当在受力平台施加竖直力时，中心圆柱体底部未发生明显应变，但会相较于自身的原始位置发生相

对位移，该过程同样会使 FBG 中心波长发生偏移。因此此处用相对位移的方式代替应变来研究弹性体受到外力时的变化特性。弹性体受到 10N 的水平力和竖直力时，中心圆柱底部的相对位移如图 4。当受到水平力的作用时，中心圆柱底部的中心位置基本不产生应变；当受到竖直力时，中心圆柱底部相对位移现象较为明显，如图 5。

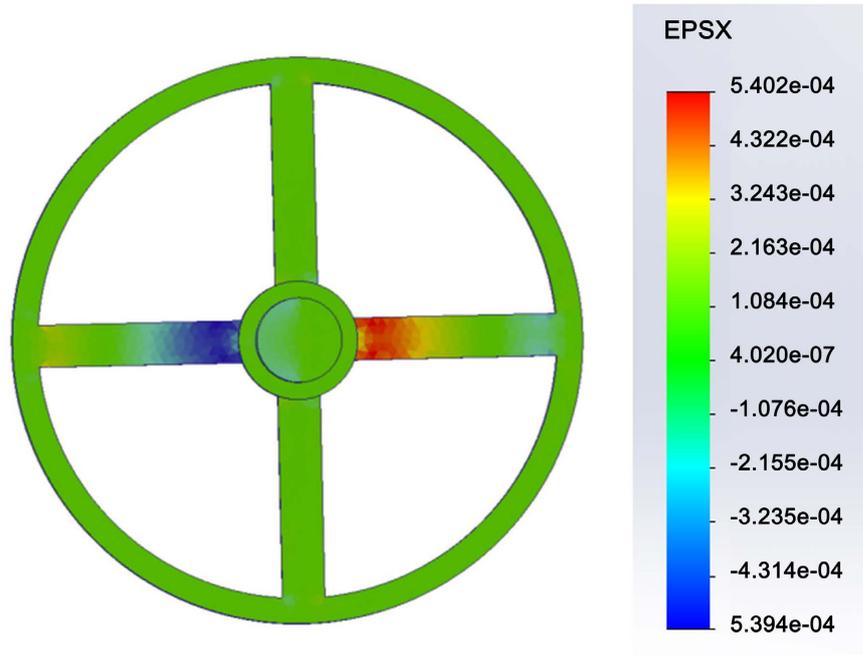


Figure 2. Strain distribution diagram on the surface of the cross beam
图 2. 十字梁上表面应变分布图

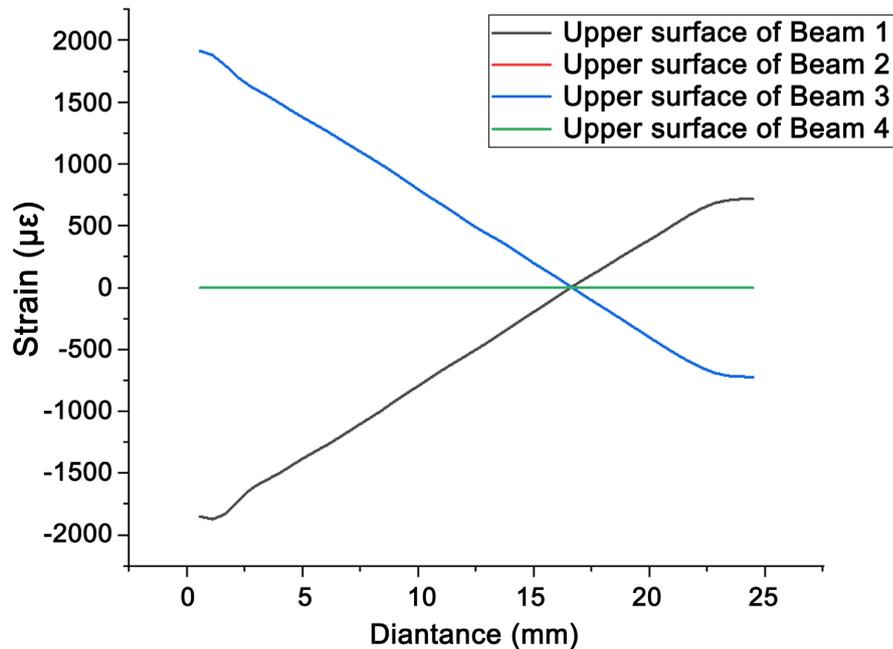


Figure 3. Strain distribution curve of cross beam under F_x action
图 3. 十字梁在 F_x 作用下的应变分布曲线

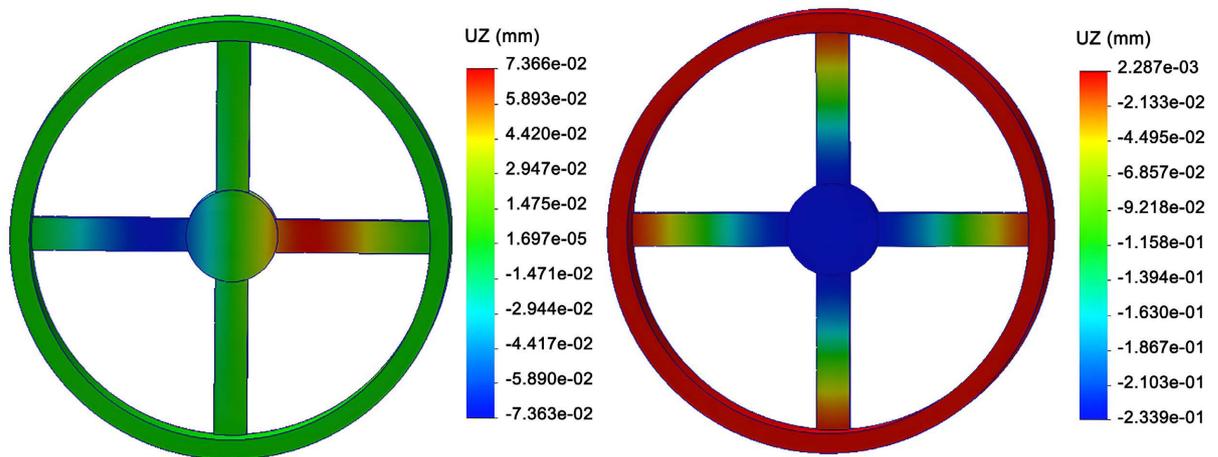


Figure 4. Distribution of relative displacement on the lower surface of an elastic body under the application of horizontal force (left) and vertical force (right)

图 4. 施加水平力(左)和竖直力(右)弹性体下表面相对位移分布图

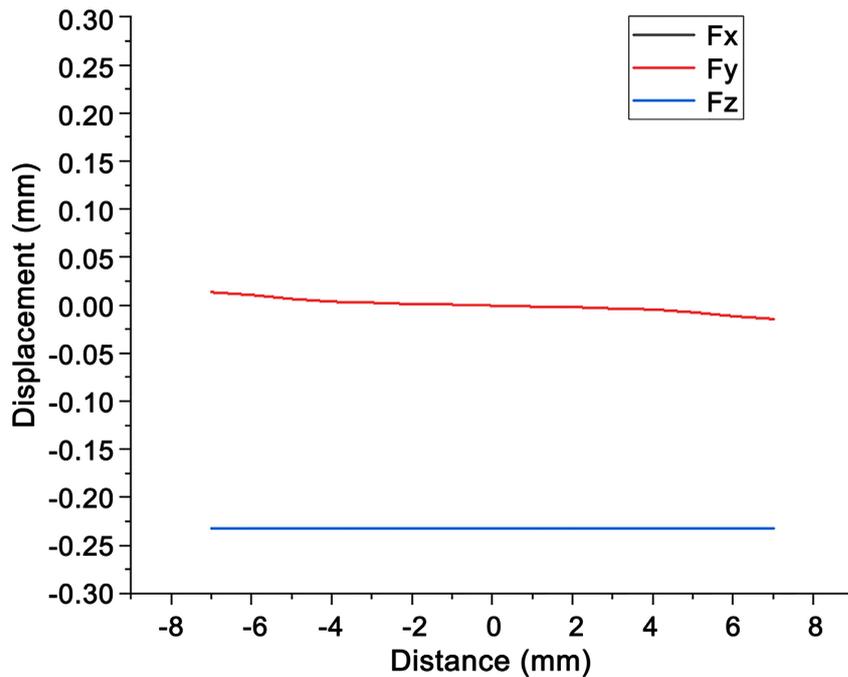


Figure 5. Relative displacement distribution curve of the lower surface of the central cylinder under horizontal and vertical forces

图 5. 中心圆柱下表面在水平力和竖直力作用下的相对位移分布曲线

4. 实验与结果分析

4.1. FBG 的粘接位置

因为弹性体十字梁具有应变由中心向外围递减且中心圆柱底部不会受到水平力的干扰的特性，故将 FBG1~FBG4 分别粘接到梁 1~梁 4 的中心位置，FBG5 粘接到中心圆柱体底部的中心位置，以降低各个 FBG 之间的耦合，如图 6。FBG1~FBG5 的中心波长分别为 1540 nm, 1545 nm, 1550 nm, 1555 nm, 1560 nm，如图 7。

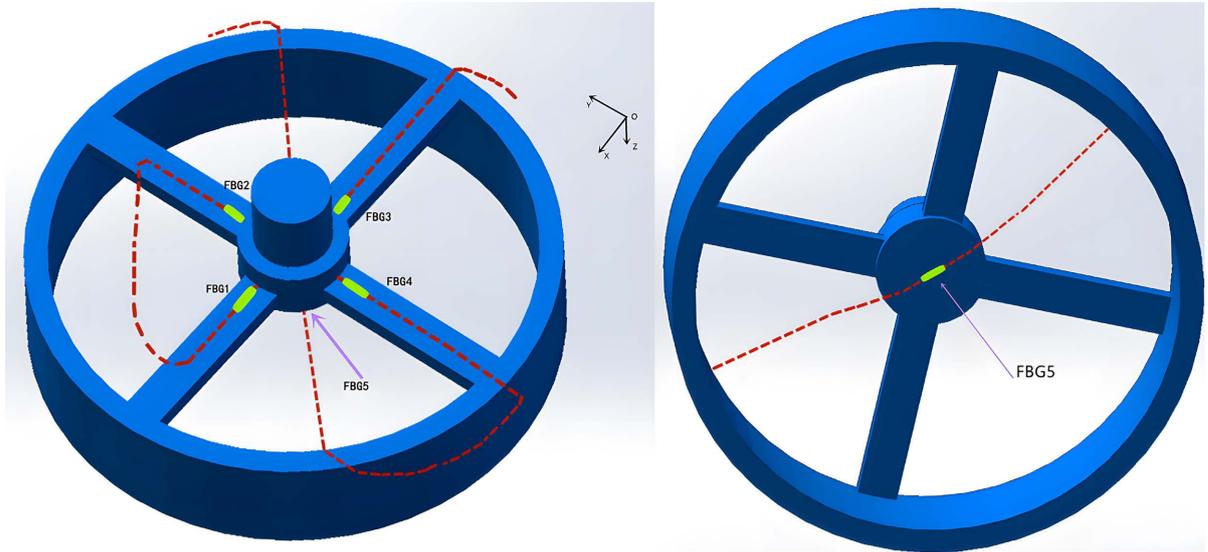


Figure 6. The bonding position of FBG on elastomers
图 6. FBG 在弹性体上的粘接位置

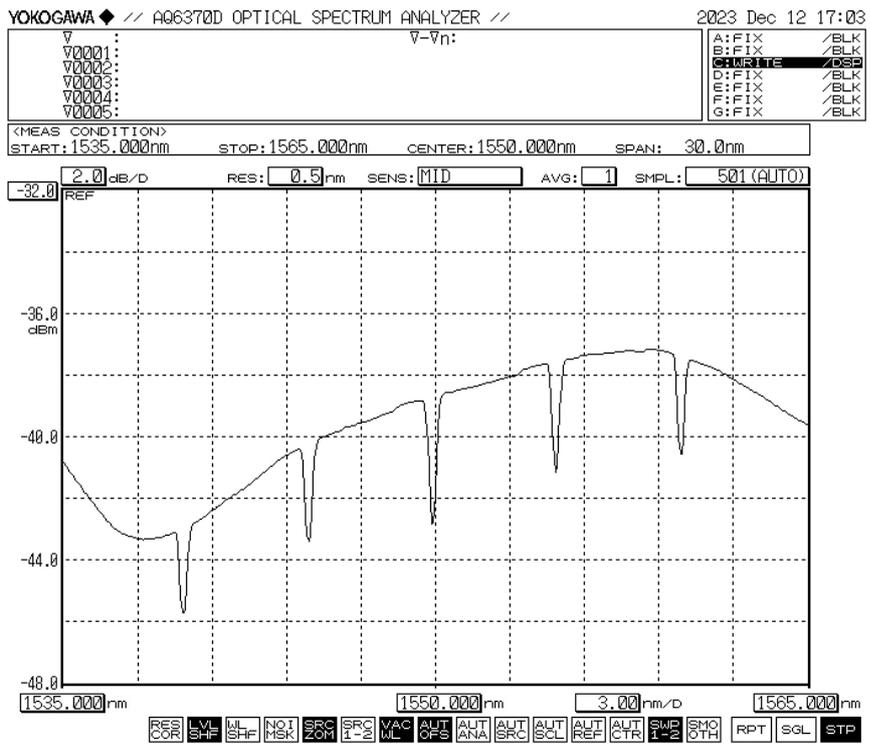


Figure 7. Fiber optic spectrogram with 5 FBGs connected in series
图 7. 5 个 FBG 串联的光纤光谱图

4.2. 传感器灵敏度

施加外部应力可以使弹性体发生微应变，进而导致粘接在弹性体上的 FBG 的中心波长发生偏移。传感器灵敏度的测量实验即通过分析不同大小的外界应力所对应的 FBG 中心波长偏移量来确定传感器的应力灵敏度。实验过程中，根据传感器材料的硬度特性， F_x 、 F_y 和 F_z 的测量范围均设置为 5N，步长为

1N。为了方便精准地施加水平外力，通过将弹性体底座固定在竖直面上，将施加水平力的步骤转化为施加竖直力，此时便可以通过改变砝码的数量控制水平或竖直外力的大小。测试重复三次，三次实验的平均值和线性拟合函数如图 8 和图 9。实验结果表明，当施加不同方向的作用力时，FBG 之间耦合性较低，基本不会对其他的光纤光栅造成影响，且线性度较高。

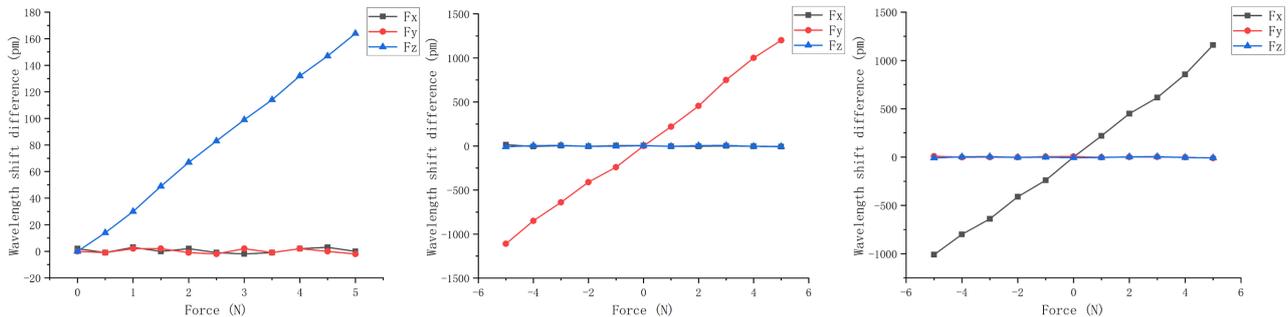


Figure 8. Apply external load, change in center wavelength of X-axis (left), Y-axis (center), and Z-axis (right)

图 8. 施加外部载荷，X 轴(左)、Y 轴(中)、Z 轴(右)中心波长变化

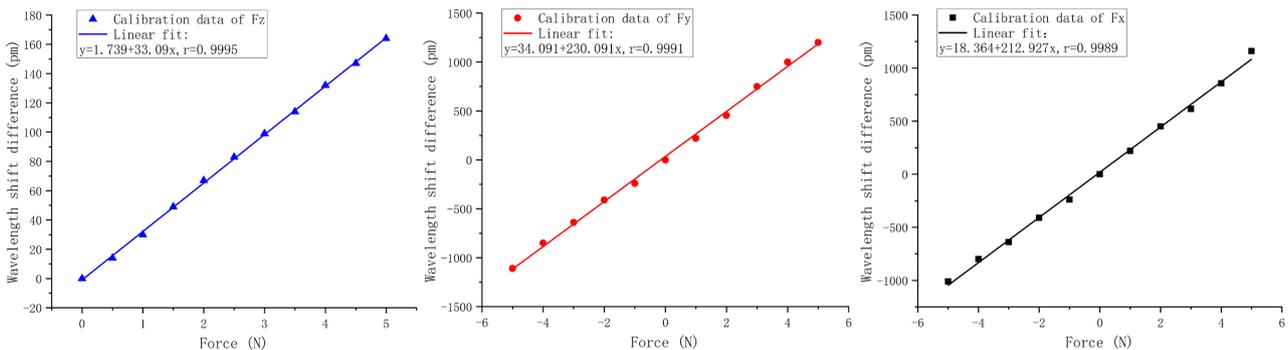


Figure 9. Linear fitting of calibration data for Fx (left), Fy (center), and Fz (right)

图 9. Fx(左)、Fy(中)、Fz(右)标定数据线性拟合

通过对标定数据的线性拟合得到各个测量维度的灵敏度。传感器在三个轴上均具有良好的线性响应，Fx、Fy、Fz 的灵敏度分别为 212.927 pm/N、230.091 pm/N、33.09 pm/N。

5. 总结与展望

本文介绍了一种将 5 段不同中心波长的 FBG 串联并粘接到十字梁弹性体上的传感器，首先通过 SolidWorks 仿真分析弹性体的应变特性；之后通过 Blender 建模并打印 3D 模型，3D 打印选择弹性高，抗蠕变性较好的树脂材料，保证了传感器的性能；最后通过分析施加外部载荷所导致的 FBG 中心波长偏移量确定了传感器的三维力传感灵敏度。通过多次实验分析，该模型传感灵敏度较高且对外力有良好的线性响应，Fx、Fy、Fz 的灵敏度分别达到了 212.927 pm/N、230.091 pm/N、33.09 pm/N。

通过对标定数据的线性拟合可以得出 Fx、Fy 的灵敏度基本相同，Fz 的灵敏度则相对较低，实验结果与理论分析及仿真结果相符合。Fx、Fy 的灵敏度未保持完全一致主要是在 FBG 与弹性体的粘接过程中存在些许差异导致的；Fz 的灵敏度相对 Fx 和 Fy 较低则是由于 FBG5 位于中心圆柱体底部，中心圆柱体在周围四根十字梁的支撑下，当受到相同大小的外部应力时，中心圆柱体底部相对十字梁的应变变量较小。后续的研究中可以通过适当降低十字梁模型的宽度和高度或者选择更佳的 FBG 排布方式来进一步提高传感器的竖直应力灵敏度，以达到预期的传感效果。

参考文献

- [1] Tian, Y.Y., He, R., Xu, W.C., *et al.* (2023) Contact Piezoresistive Sensors Based on Electro-Polymerized Polypyrrole and a Regulated Conductive Pathway. *ACS Applied Materials Interfaces*, **15**, 49583-49594. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c09837>
- [2] 张海涛, 阎贵平. MEMS 加速度传感器的原理及分析[J]. 电子工艺技术, 2003(6): 260-262+265.
- [3] Wang, J., Qin, X.Z., Liu, Z.M., *et al.* (2021) Development and Performance Analysis of Hemispherical Piezoelectric Transducer for Road Applications. *Ferroelectrics*, **584**, 70-84. <https://doi.org/10.1080/00150193.2021.1984760>
- [4] 蒙文舜, 杨运经, 刘云鹏. 电容传感器的原理及应用[J]. 现代电子技术, 2003(7): 78-81.
- [5] 赵爱玲, 张海峰. 一种基于光学传感器的新型触摸板的设计[J]. 激光与红外, 2011, 41(10): 1159-1162.
- [6] 黄尚廉, 陈伟民, 饶云江, 等. 光纤应变传感器及其在结构健康监测中的应用[J]. 测控技术, 2004(5): 1-4+8. <https://doi.org/10.19708/j.ckjs.2004.05.001>
- [7] Pradhan, H.S. (2021) Sensing Accuracy Enhancement of Long-Range Distributed Fibre-Optic Temperature Sensor Using Hybrid Algorithm. *IET Science, Measurement & Technology*, **15**, 569-577. <https://doi.org/10.1049/smt2.12058>
- [8] Fernandez, A., Berghmans, F., Brichard, B., *et al.* (2001) Multi-Component Force Based on Multiplexed Fiber Bragg Grating Strain Sensors. *Measurement Science and Technology*, **12**, 810-813. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/7/310>
- [9] Heo, J., Chung, J. and Lee, J. (2005) Tactile Sensor Arrays Using Fiber Bragg Grating Sensors. *Sensors Actuators A: Physical*, **126**, 312-327. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.10.048>
- [10] Guo, Y.X., Kong, J.Y., Liu, H.H., *et al.* (2016) A Three-Axis Force Fingertip Sensor Based on Fiber Bragg Grating. *Sensors Actuators A: Physical*, **249**, 141-148. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.08.020>