

Research on Force Sensing Technology Based on Fiber Bragg Grating

Danping Jia, Can Cao, Hechi Ma

School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang Liaoning
Email: winnerjia@sohu.com, 2271675445@qq.com

Received: Jun. 18th, 2019; accepted: Jul. 3rd, 2019; published: Jul. 10th, 2019

Abstract

Based on fiber Bragg grating design force detection system to realize the robot's perception of external forces, the principle of fiber grating force measurement is introduced. Elastic structure of sensor using the ANSYS finite element analysis for the static, modal and transient analysis to obtain the stress and strain of the elastic structure when subjected to forces/torques in all directions. The paste position of the fiber Bragg grating is determined. On the basis of the simulation, pressure experiments were carried out to determine the sensitivity, linearity, repeatability and stability of the force sensor.

Keywords

Fiber Bragg Grating, Force Sensor, Elastic Structure, Finite Element Analysis

基于光纤Bragg光栅的力传感技术研究

贾丹平, 曹 璨, 马赫驰

沈阳工业大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳
Email: winnerjia@sohu.com, 2271675445@qq.com

收稿日期: 2019年6月18日; 录用日期: 2019年7月3日; 发布日期: 2019年7月10日

摘 要

基于光纤Bragg光栅设计力的检测系统, 以实现机器人对外界力的感知。介绍光纤Bragg光栅的测力原理, 利用ANSYS有限元分析法对传感器弹性结构体进行静态、模态和瞬态的分析, 以获得弹性结构体在受到各方向的力/力矩时的应力应变情况, 确定光纤Bragg光栅的粘贴位置。在模拟的基础上, 进行压力实验, 确定力传感器的灵敏度、线性度、重复性以及稳定性等指标。

关键词

光纤Bragg光栅, 力传感器, 弹性结构体, 有限元分析

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

随着机器人技术和智能技术的快速发展, 智能机器人已逐步融入到各行各业, 机器人在与外界的信息交互中对力的感知是十分重要的。其中, 机器人力的控制系统中多维腕力传感器是最重要的传感器之一。多维腕力传感器可以感知来自三维空间中各个方向的力和力矩, 这样便可以实现对机器人力的监控, 这也有助于机器人对环境的认识以便及时作出相应的反应。

基于多维腕力传感器的重要性, 它也成为了国内外研究的热点。早在 1975 年 Wasto 等人就设计出了首个三垂直筋结构的多维腕力传感器[1]; 同年, Scleinma 设计出了水平十字梁结构的多维腕力传感器[2]; 1983 年, Stanford 研究出了筒形多维力传感器[3]; 同年, Reboulet 等人设计出了首个基于 Stewart 平台的多维腕力传感器, 这些早期研究对日后的研究都起到了至关重要的作用。随后, 日本、德国、美国等也相继研究出了多种多维腕力传感器结构, 直至上个世纪 80 年代后期, 我国也研究出了第一台五维和六维的腕力传感器; 山东大学的蒋奇讨论了一种多维力传感器结构[4], 其线性度和灵敏度等性能指标均良好。

上述多维腕力传感器主要是应变式的, 并且是基于敏感元件的应变特性设计的。传统应变片式多维腕力传感器需要粘贴大量的应变片, 在空间小且集中的情况下很难保证位置的准确、对称和可靠, 并且也很难在恶劣的环境下正常工作。近年来, 以光纤 Bragg 光栅为敏感元件的多维腕力传感器具有灵敏度高, 电绝缘性能好, 抗电磁干扰能力强, 可在恶劣环境中工作, 可复用, 粘贴数量少, 节省成本等优点。本文即采用光纤 Bragg 光栅做为敏感元件, 对弓形梁结构的多维腕力传感器弹性体进行分析[5]。

2. 光纤 Bragg 光栅理论及传感原理

光纤光栅的结构以及原理如图 1 所示。由光源发出的光传输到光纤光栅上, 其中与 FBG 相位匹配的光被反射, 与其相位不匹配的光就会被透射。

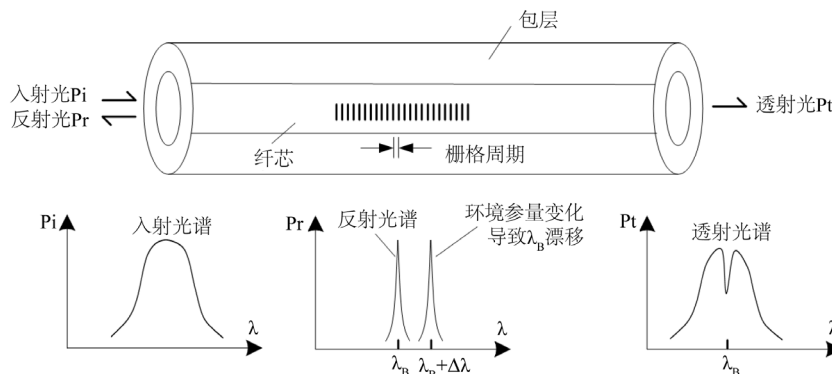


Figure 1. Structure and schematic of FBG

图 1. FBG 的结构和原理图

若测量系统所处位置的温度、应变等被引起变化时,系统内部的 FBG 的折射率 n_{eff} 和周期 Λ 也会产生改变。光纤光栅中心波长满足以下条件[6]:

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

其中, λ_B 为 FBG 的中心波长; n_{eff} 为光栅区的有效折射率; Λ 为光栅周期。

由式(1)可知, FBG 的中心波长随纤芯的有效折射率 n_{eff} 或光纤周期 Λ 的变化而发生变化。因此,当外界应力或温度发生变化时,波长会发生相应的漂移。假设 FBG 受到外界的应力没有切向应力,且环境温度不变。FBG 的应变计算公式为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - P_\epsilon) \cdot \epsilon \quad (2)$$

其中, λ_B 为 FBG 的中心波长, $\Delta\lambda_B$ 为波长的变化量, P_ϵ 为 FBG 的有效弹光系数, ϵ 为应力的张量。此式反应了 FBG 的波长漂移变化与应变之间的关系。然而,光纤 Bragg 光栅的传感特性均是材料与材料相关的常数,所以波长的变化可以认为和应变的变化呈线性关系。

3. 弹性体结构的仿真分析

弹性体是力传感器中的核心部件,通过分析弹性体结构在受力时的应力应变情况,可以得到传感器的灵敏度以及线性度等性能,并且也可以以此来监测传感器的健康状况,以便传感器可以很好的应用于实际场合中。

ANSYS 大型通用有限元分析软件是由美国 ANSYS 公司研发的,它可以对结构力学、热学、电磁场和声场、流体力学和耦合场等问题进行分析。本课题使用经典 ANSYS 中自带的建模模块来构建弹性体的模型[7]。在建模中,传感器的弹性梁及传感器的整体将通过布尔代数运算成为一个整体。使用的单元类型为 SLOID187,弹性体的材料为 304 不锈钢,弹性模量为 206 Gpa,泊松比为 0.269,密度为 7800 Kg/m³。采用手动方式进行网格划分,划分后得到 90,110 个节点, 45,979 个单元。然后进行静力学分析、模态分析和瞬态分析[8]。

3.1. 静力学分析

用 ANSYS 对弹性体进行静力学分析,在其上圆环面施加不同方向的单维力/力矩,计算求解后在后处理模块中查看弹性体的应力应变情况,其云图如图 2 所示。由弹性梁的变形情况可知,在受到不同方向的单维力/力矩时,最明显的应变出现在弹性梁的外表面。因此,应在四条弹性梁的外表面的相应位置粘贴 FBG,这样就可以使弹性体在具体的模拟实验中得到较好的实验结果。最后,可以根据弹性梁的形变来模拟粘贴在外表面上的 FBG 的形变,以此推断出 FBG 中心波长的偏移情况。

这里着重分析弹性体在 Z 方向上受单维力的情况,基于弹性体使用的实际背景是工业机器人手臂,查阅文献资料可知,其测力范围为[0, 800N],这里以 100N 为步长,对其施加从 100N 到 800N 的 Z 方向的单维力。记录每次的位移偏移量,由此可以画出力与形变之间的拟合直线如图 3 所示。根据图可知,其在受到 Z 方向的单维力时,弹性体的灵敏度为 0.4881 $\mu\text{m}/\text{N}$ 。

3.2. 模态分析

为了避免结构共振或以特定频率进行振动,需对弹性体进行模态分析以获得其固有频率以及振型。用 ANSYS 软件对弹性体进行模态分析,其模态云图如图 4 所示,并且其固有频率及特征振型分析如表 1。由此可以看出,前 6 阶的固有振型可以反映出弹性体在受到单维力/力矩时的变形情况,各阶固有频率对应弹性体各方向的固有频率。由于结构与约束的对称性,第一阶和第二阶、第四阶和第五阶的固有

频率基本相同，振型相似。腕力传感器是低通型的传感器，一般由第一阶的固有频率的 2/3 来确定工作带宽[9]。因此，估算出其工作带宽约为 0 Hz~65.63 Hz。

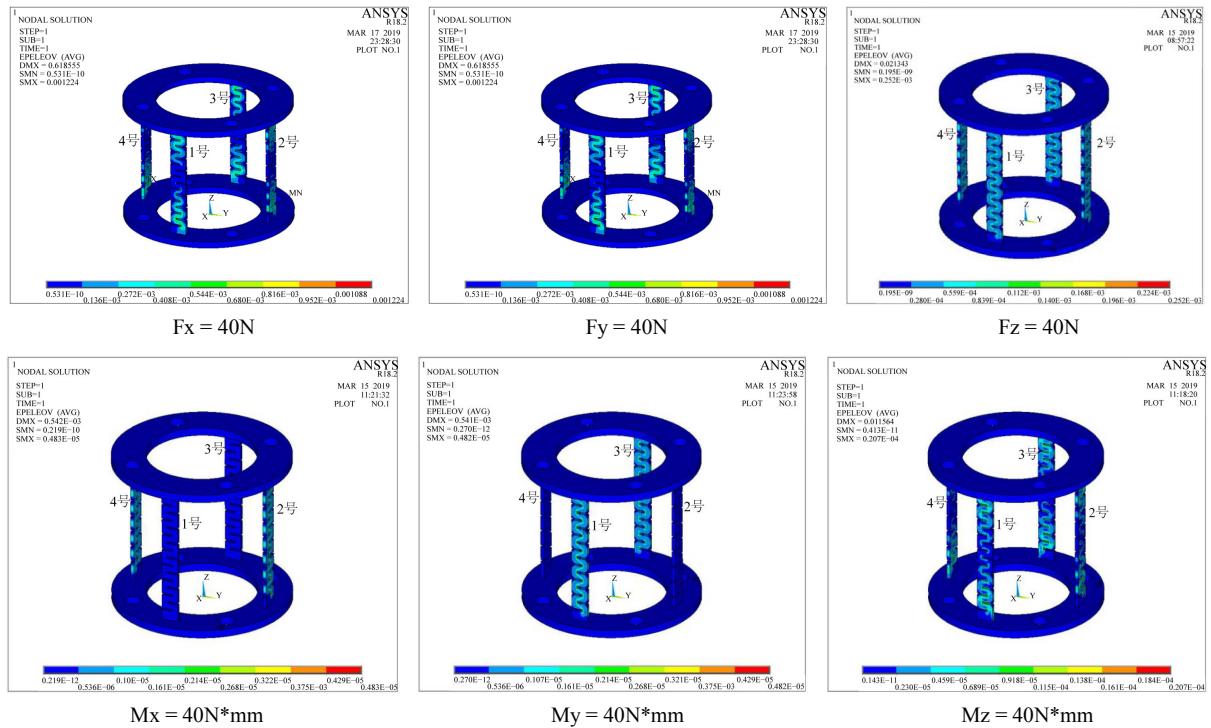


Figure 2. Stress cloud diagram
图 2. 应力云图

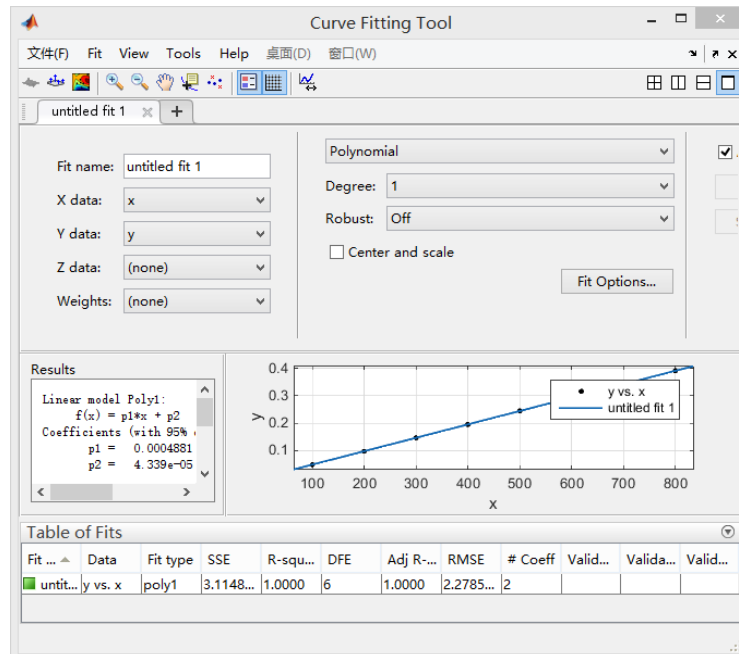


Figure 3. Force-deformation fit straight line
图 3. 力 - 形变拟合直线图

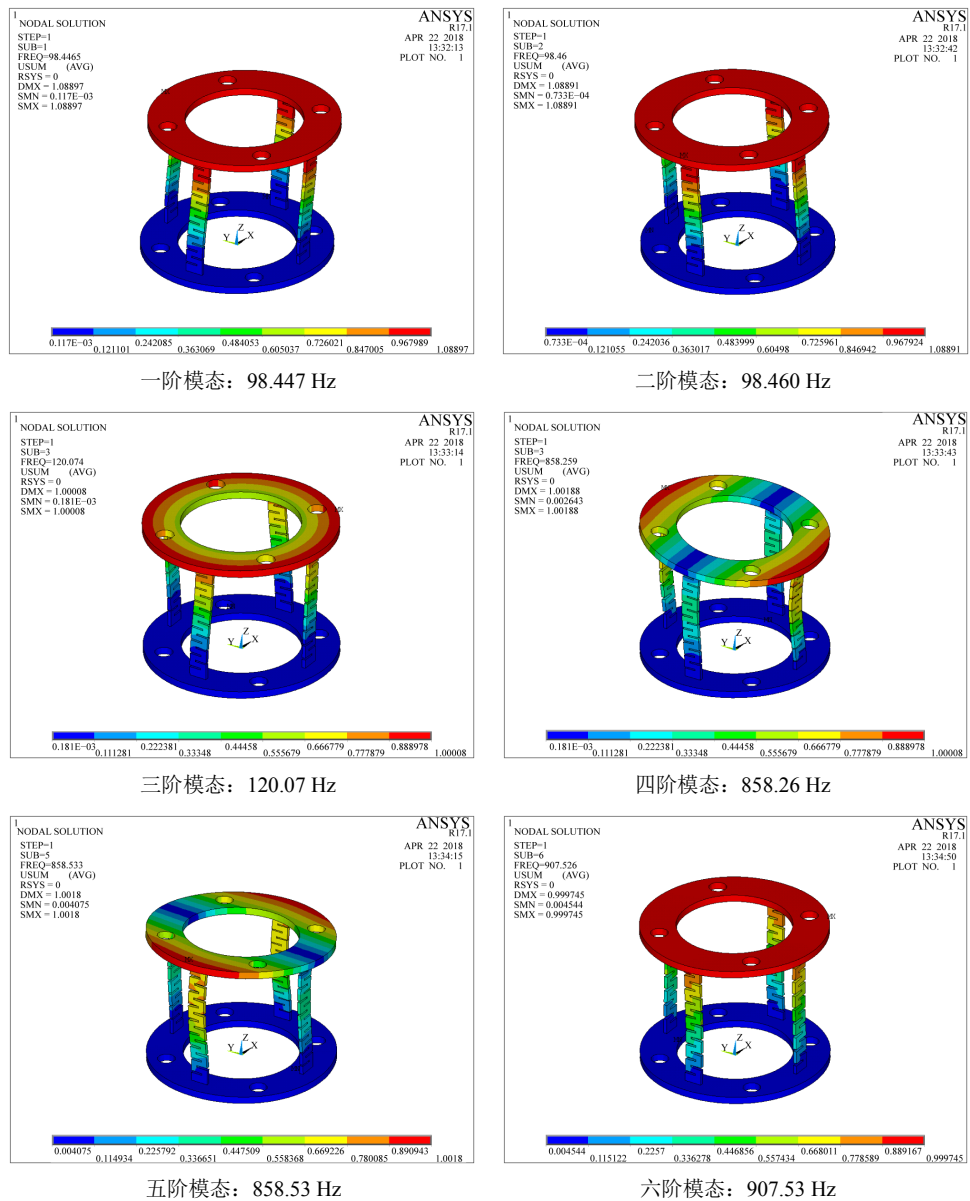


Figure 4. Modal cloud map
图 4. 模态云图

Table 1. Elastomer natural frequency and mode shape
表 1. 弹性体固有频率和振型

阶数	频率(Hz)	振型
一阶	98.447	沿 x 方向平动
二阶	98.460	沿 y 方向平动
三阶	120.07	沿 z 方向转动
四阶	858.26	沿 x 方向转动
五阶	858.53	沿 y 方向转动
六阶	907.53	沿 z 方向平动

3.3. 瞬态分析

为了更好地对机器人多维腕力传感器的受力情况进行模拟, 本文使用 ANSYS 对传感器弹性体结构进行瞬态动力学分析。当弹性体的上表面受到幅值为 0.1 KPa 的动态载荷(如正弦信号、阶跃信号、脉冲信号等)时, 通过仿真分析观察每个弹性梁的变形情况, 如图 5 所示。

根据模拟分析的结果可知, 在弹性体的上表面施加 Z 方向的正弦、阶跃以及脉冲信号的激励时, 弹性体在 Z 方向上的位移变化也呈现正弦、阶跃和脉冲的形式, 只是相位差了 180°。由此可见, 当弹性体受到外界瞬态动力荷载时, 4 条弹性梁的变形输出相同。根据阶跃信号的分析, 得知其延迟时间为 35 ms。

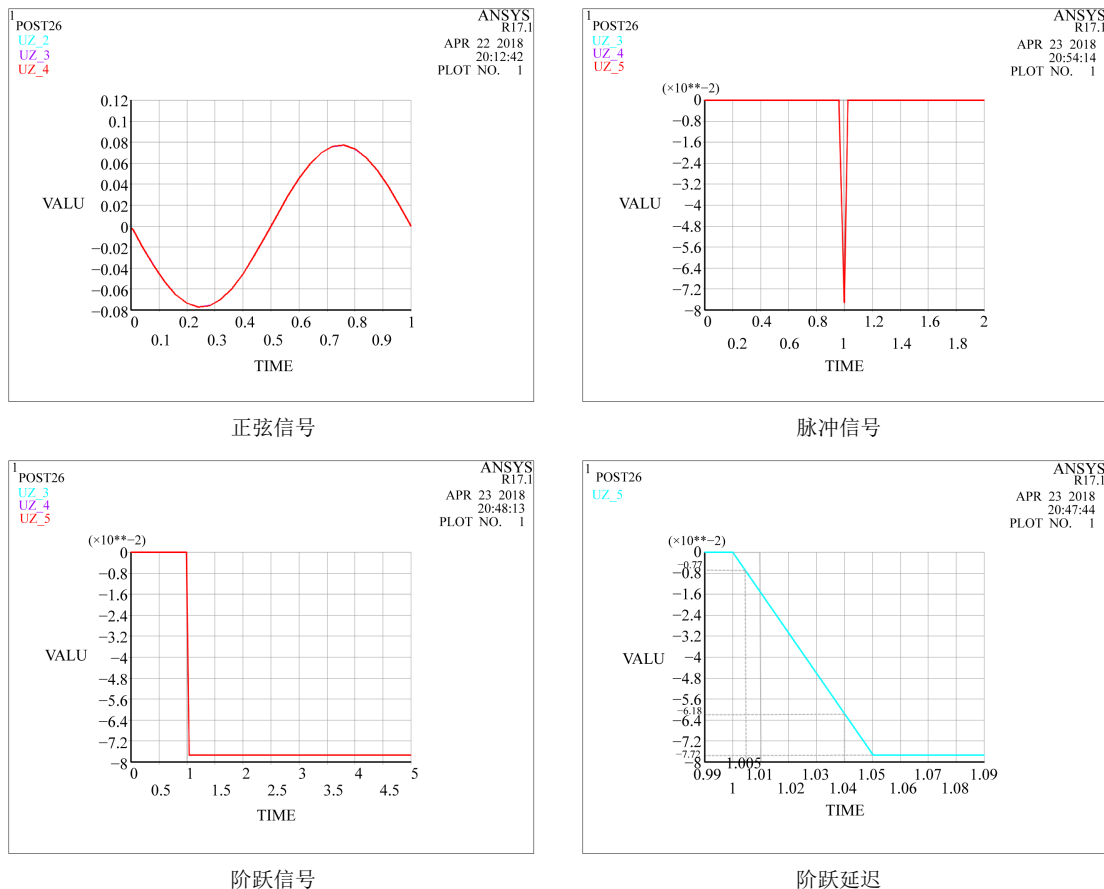


Figure 5. Deformation of the elastic beam
图 5. 弹性梁变形情况

4. 测力系统设计

该测力系统由硬件与软件两大部分组成, 主要包括电源、宽带光源、环形器、光纤 Bragg 传感器、FBGA 解调模块以及基于 Visual Studio 2015 的上位机模块等。系统的测量原理: 用宽带光源将激励光入射至 FBG 中, 当有外界力作用在弹性体上时, 弹性梁上的敏感元件就会受到拉压作用, 这就使得作为弹性敏感元件的 FBG 的中心波长发生变化。此时产生的光信号通过解调模块后变成数字信号传输给 PC 机, 然后对信号进行采集、分析和记录。由于 FBG 波长的应变情况与其中心波长、弹性体材料和弹性体受到的外力的大小有关, 当确定弹性体的结构时, 就可以根据 FBG 中心波长的偏移量推算出弹性体的受到的力的大小。

5. 模拟实验

搭建实验系统, 进行模拟实验, 由于实验室条件有限, 仅对弹性体上表面施加 Z 方向的单维力来进行灵敏度实验、重复性实验和稳定性实验, 模拟实验实物图如图 6 所示。



Figure 6. Simulation experiment physical map
图 6. 模拟实验实物图

5.1. 弹性体结构

根据具体情况, 弹性体选用的材料为 304 不锈钢, 其基本几何参数如表 2 所示, 且弹性体实物图如图 7 所示。

由弹性体的仿真分析可知, 当受到各方向的单维力/力矩时, 根据弹性梁的应力应变情况, 可以推测出粘贴在弹性梁外表面上的 FBG 的中心波长偏移情况。将弹性梁上的 FBG 分别编号为 FBG1、FBG2、FBG3、FBG4, 由于受到的力/力矩不同, FBG 的中心波长的偏移量是不同的, 因此, 受力情况与 FBG 中心波长偏移量的关系可以表示为 $[F_x \ F_y \ F_z \ M_x \ M_y \ M_z]^T = C[\Delta\lambda_1 \ \Delta\lambda_2 \ \Delta\lambda_3 \ \Delta\lambda_4]^T$ 。

其中, C 为 6*4 的系数耦合矩阵。

Table 2. Basic geometric parameters of the elastomer (mm)
表 2. 弹性体基本几何参数(mm)

结构	长度(外半径)	宽度(内半径)	厚度(高度)
弓形梁	70	10	2
圆环	52	32	4



Figure 7. Elastomer physical map
图 7. 弹性体实物图

5.2. 灵敏度实验

根据仿真已知，当弹性体上表面施加 Z 方向的单维力时，四个梁的受力情况是一致的，为简化实验，仅对其中一条梁进行分析。实验中，以 10 N 为步长，从 10 N 加至 80 N，记录 FBG 中心波长的变化况，得出中心波长变化量与压力之间的关系，其拟合直线图如图 8 所示。根据拟合直线图可以看出其拟合关系式为：

$$\Delta\lambda = 0.0001617 * F + 0.04609 \quad R^2 = 0.9996 \quad (3)$$

因此，灵敏度为 0.1617 pm/N，拟合率为 0.9996。由于实验时，是将光纤光栅粘贴在弹性梁上，利用 FBG 的中心波长变化量与力之间的关系进行测量的，而且实验室条件有限，不能对 FBG 进行严格的封装，环境温度以及焊接工艺等其他外界条件都对结果有影响，所以，光纤光栅的灵敏度比弹性体的灵敏度要小得多。

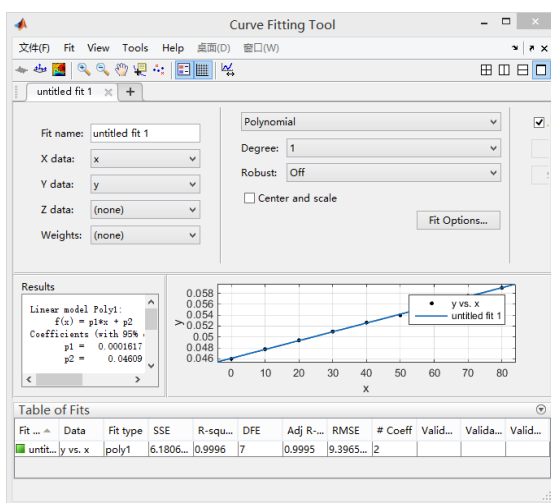


Figure 8. Fit line diagram

图 8. 拟合直线图

5.3. 重复性实验

实验中，以 10N 为步长，从 10N 加至 80N，这样往复加载卸载多次，得出加卸载的拟合直线图如图 9 所示。可以看出，其线性度很好，重复性稍有偏差，分析原因是 FBG 与弹性体贴合不紧密所致。

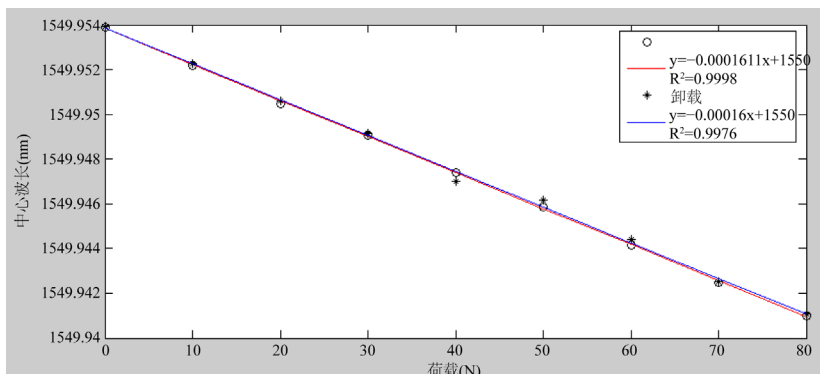


Figure 9. Adding and unloading fit line graph

图 9. 加卸载拟合直线图

5.4. 稳定性实验

实验中, 在弹性体上表面施加力, 且单独的多次的进行同一力的加载, 观察压力输出情况如表 3 所示, 可以看出其稳定性较好, 并且由此也可以看出其最大的系统误差为 0.89252N, 最大的相对误差为 4.4763%, 证明了该测力系统的可行性。

Table 3. Measurements and errors of four times under different forces

表 3. 不同力下四次的测量值及误差

压力(N)	第一次(N)	第二次(N)	第三次(N)	第四次(N)	误差(N)	相对误差(%)
10	10.581	10.118	10.470	10.526	0.42375	4.2375
20	21.181	21.107	21.132	19.839	0.89525	4.4763
30	30.093	30.377	32.214	30.229	0.72825	2.4275
40	40.315	40.118	40.223	40.328	0.246	0.615
50	49.913	49.901	50.012	50.297	0.12375	0.2475
60	60.260	59.981	60.179	60.711	0.29225	0.48708
70	70.631	70.588	70.569	70.600	0.597	0.82857
80	79.858	79.957	79.994	79.926	0.06625	0.082813

6. 结论

为了实现机器人对外界力的感知, 本文分析了以 FBG 为传感元件的腕力传感器的弹性体, 并设计了基于光纤 Bragg 光栅的测力系统。其中, 采用 ANSYS 软件对弓形梁弹性体进行静力学、模态和瞬态的仿真分析; 搭建了模拟实验系统, 完成了模拟实验。实验表明, 弓形梁弹性体可以测量各方向的力/力矩, 并且其灵敏度高, 重复性、稳定性以及线性度均较好。

参考文献

- [1] Drake, S.H. and Watson, P.C. (1978) Method and Apparatus for Six Degree of Freedom Force Sensing. US Patent 4094192, 1978-6-13.
- [2] Scheinman, V.D. (1969) Design of a Computer Controlled Manipulator. Stanford University, Computer Science Department, Stanford.
- [3] Qiao, H., Dalay, B.S. and Parkin, R.M. (1993) Robotic Peg-Hole Insertion Operations Using a Six-Component Force Sensor. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, **207**, 289-306. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1993_207_134_02
- [4] 蒋奇, 宋金雪, 高芳芳, 李贻斌, 荣学文, 等. 基于光纤光栅的机器人多维力传感技术研究[J]. 光电子激光, 2014, 25(11): 2123-2129.
- [5] 许会超, 苗新刚, 汪苏, 彭新改. 一种机器人多维光纤光栅力传感器[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(12): 1881-1884.
- [6] 关寿华, 于清旭, 宋世德, 郑建洲. 长周期光纤光栅温度特性的理论与实验研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(3): 543-545.
- [7] 刘涛, 杨凤鹏. 精通 ANSYS [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 1-517.
- [8] Tu, Z.-F. (2010) ANSYS Finite Element Analysis Engineering Application Tutorial. China Building Industry Press, Beijing, 1-378.
- [9] 刘正士, 陆益民, 陈晓东, 王国泰, 葛运建. 一种机器人多轴腕力传感器弹性体有限元分析[J]. 机械设计, 1998, 12(5): 12-14.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网首页：<http://cnki.net/>，点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”，跳转至：<http://scholar.cnki.net/new>，搜索框内直接输入文章标题，即可查询；
或点击“高级检索”，下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2331-0235，即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版：<http://www.cnki.net/old/>，左侧选择“国际文献总库”进入，搜索框直接输入文章标题，即可查询。

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jsta@hanspub.org