

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905937

# 基于光纤布拉格光栅的二维力传感器设计及实验研究\*

孙世政<sup>1,2</sup>, 廖超<sup>1</sup>, 李洁<sup>2</sup>, 蒙志强<sup>1</sup>, 向洋<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学机电与车辆工程学院 重庆 400074; 2. 重庆邮电大学移通学院智能工程学院 重庆 401520)

**摘要:**针对目前多维力传感器难以同时兼顾电磁干扰、接线复杂、维间耦合较大及灵敏度较低的问题,设计了一种基于光纤布拉格光栅的二维力传感器。首先,基于光纤布拉格光栅传感理论和简支梁弯曲变形理论,设计了十字横梁结构的传感器弹性体,并揭示光纤光栅传感器波长漂移量与力的映射关系;其次,采用有限元分析方法研究弹性体的应变分布特性,确定光纤布拉格光栅最佳封装位置;最后,搭建了实验标定平台,对传感器的灵敏度、线性度、维间耦合误差以及重复性误差进行实验研究。实验结果表明,该传感器 $x$ 、 $y$ 方向的波长灵敏度分别约为7.464、7.520 pm/N,线性度分别约为3%、2%,维间耦合误差分别约为1.01%、0.218%,重复性误差分别约为4.898%、5.828%。该传感器可应用于机器人腕部二维力测量,对提高机器人关节的高精度控制反馈具有重要意义。

**关键词:** 光纤布拉格光栅; 二维力传感器; 十字横梁结构; 维间耦合

**中图分类号:** TH823 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

## Design and experiment study of two-dimensional force sensor based on fiber Bragg grating

Sun Shizheng<sup>1,2</sup>, Liao Chao<sup>1</sup>, Li Jie<sup>2</sup>, Meng Zhiqiang<sup>1</sup>, Xiang Yang<sup>1</sup>

(1. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of Intelligent Engineering, College of Mobile Telecommunications, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 401520, China)

**Abstract:** Aiming at the problems that current multi-dimensional force sensors can hardly simultaneously take into account electromagnetic interference, complicated wiring, large dimensional coupling and low sensitivity, this paper presents a two-dimensional force sensor based on fiber Bragg grating. Firstly, based on the theories of fiber Bragg grating sensing and bending deformation of simply supported beam, a sensor elastic body with cross beam structure is designed, and the mapping relationship between the fiber grating sensor wavelength drift and the force is derived. Then, the finite element analysis method is used to study the strain distribution characteristics of the elastic body and determine the optimal sticking position of the fiber Bragg grating. Finally, an experiment calibration platform was established to conduct experiment research on the sensitivity, linearity, inter-dimensional coupling error and repeatability error of the sensor. The experiment results show that the wavelength sensitivities of the sensor in the  $x$  and  $y$  directions are approximately 7.464 and 7.520 pm/N, the linearities are approximately 3% and 2%, the inter-dimensional coupling errors are approximately 1.01% and 0.218% and the repeatability errors are approximately 4.898% and 5.828%, respectively. The sensor can be applied to two-dimensional force measurement of the wrist of the robot and has great significance for improving the high-precision control feedback of the robot joint.

**Keywords:** fiber Bragg grating; two-dimensional force sensor; cross beam structure; inter-dimensional coupling

收稿日期: 2019-12-23 Received Date: 2019-12-23

\* 基金项目: 中国博士后科学基金面上项目(2018M633626XB)、城市轨道交通系统集成与控制重庆市重点实验室开放基金(CKLURTSIC-RFKT-201806)、重庆市科委基础科学与前沿技术研究项目(cstc2017jcyjAX0053)、交通工程应用机器人重庆市工程实验室开放课题(CELTEAR-KFKT-201805)资助

## 0 引言

力传感器作为一类关键传感器,由于能测量环境相互作用的能力,被广泛运用于机器人领域<sup>[1]</sup>。安装于机器人腕部的多维力传感器,用来感知机器人受外部环境力作用时的空间信息,以便准确完成相应工作,如轮廓跟踪、抛光打磨、抓放或搬运工件等。

自20世纪70年代以来,多维力传感器的研究已有近半个世纪的发展历史,按照测量原理分有:电阻应变式<sup>[2-8]</sup>、电容式<sup>[9-10]</sup>和光学式<sup>[11]</sup>等。目前,电阻应变式多维力传感器发展早、应用较为广泛。这类传感器具有高精度、高灵敏度的特点,但由于电阻应变片较多,存在较强电磁干扰、接线复杂的问题。

光纤光栅(fiber Bragg grating, FBG)力传感器<sup>[12]</sup>与传统的电阻应变式、电容式力传感器相比,由于所使用的敏感元件为FBG,因此具有抗电磁干扰、耐腐蚀性强、可在恶劣环境下工作,且可沿一根光纤排列多个FBG,易于接线的优点。与传统光学式力传感器相比<sup>[13]</sup>,由于其传感信号为波长调制,因而具有一些明显优于普通光学式力传感器的优点,主要表现在长期可靠性好,可实现高精度数字传感。为此,众多学者对FBG多维力传感器开展了一系列的研究,并取得了一定的成果。蒋奇等<sup>[14]</sup>将3根FBG分别粘贴于水平“Y”字梁上,设计出一种基于FBG的多维力传感器,但该传感器弹性梁变形较小,灵敏度较低,且由于浮动梁影响,存在较大的维间耦合;仲志成等<sup>[15]</sup>将9根FBG制定成两组直角应变花和一组等角应变花,实现对空间中任意主应力的测量,但各组应变花交错布置于传感器受力杆,应变花布置复杂,维间耦合较大;Guo等<sup>[16]</sup>提出了一种分离式弹性体结构,将6根FBG粘贴于内外体,但内体变形过小,FBG不易检测;许会超等<sup>[17]</sup>将4根FBG粘贴于竖梁式结构的4根弓形梁上,设计出一种多维力传感器,灵敏度较高,但由于FBG粘贴于竖梁式结构,其横向性较差,导致传感器维间耦合较大;Xiong等<sup>[18]</sup>提出一种基于FBG的机器人足力传感器,灵敏度较高,由于所用FBG较多,导致传感器整体结构复杂,增大了维间耦合干扰。由此可见,对FBG多维力传感器的研究具有较好的发展潜力,但仍存在一定的不足,能揭示FBG多维力传感器载荷与FBG波长漂移量的本质关系的研究鲜有报道,且不能同时兼顾高灵敏度和弱耦合性。

针对以上问题,本文提出一种基于FBG的二维力传感器。基于简支梁变形理论,建立了传感器的理论计算模型,揭示了FBG波长漂移量与力的映射关系,并通过有限元仿真及标定实验研究了该传感器的灵敏度、线性度、重复性及维间耦合干扰。

## 1 FBG 二维力传感原理

### 1.1 FBG 传感原理

由耦合模理论<sup>[19]</sup>可知,宽带光在FBG中传播时,其反射光遵守布拉格反射条件,数学表达式为:

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

式中: $\lambda_B$ 为FBG中心波长; $n_{\text{eff}}$ 为光栅纤芯的有效折射率; $\Lambda$ 是光栅常数。

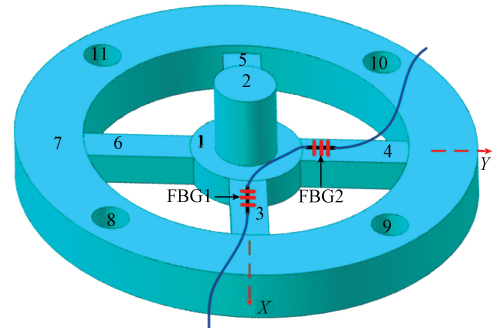
若温度恒定,FBG受轴向应变作用时,会改变FBG的有效折射率和光栅常数,其中心波长会发生相应的漂移,由式(1)可得FBG漂移量为<sup>[20]</sup>:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\varepsilon_z \quad (2)$$

式中: $P_e$ 为有效弹光系数,对于石英材料,其值为0.22; $\varepsilon_z$ 为光纤所受轴向应变。

### 1.2 二维力传感原理

本传感器结构如图1所示,其弹性体设计尺寸如表1所示。



注:1-中心台;2-传力柱;3~6-弹性梁;7-轮缘;8~11-轮缘孔。

图1 FBG 二维力传感器结构

Fig.1 FBG two-dimensional force sensor structure

表1 传感器尺寸参数  
Table 1 Sensor dimension parameters mm

参数	弹性梁	中心台	传力柱	轮缘	轮缘孔
长度	17	-	-	-	-
宽度	6	-	-	-	-
高度	5	5	40	8	8
直径	-	18	10	74	6

当传感器受水平单维力 $F$ 作用时,中心台处由于传力柱存在而受力矩 $M$ 作用,可得:

$$M = FH \quad (3)$$

式中: $M$ 为中心台所受力矩; $F$ 为传感器所受水平外力; $H$ 为传力柱高度。

将连接弹性梁的中心台简化为刚体,即视为杆件,简

支梁中心受力矩作用时的变形模型如图2所示。

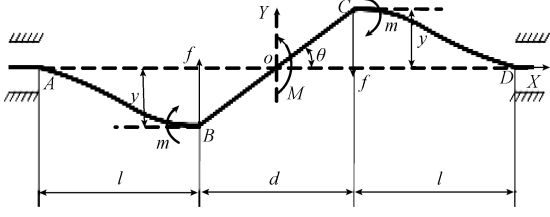


图2 简支梁受力矩变形模型

Fig.2 Moment deformation model of simply supported beam

由图2可知,简支梁受力矩变形方程组<sup>[21]</sup>如下:

$$\begin{cases} 2m = fd = M \\ 2y/d = \sin\theta \\ \frac{ml}{EI} - \frac{fl^2}{2EI} = \theta \\ y = \frac{fl^3}{3EI} - \frac{ml^2}{2EI} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $d$  为中心台直径;  $l$  为弹性梁长度;  $I$  为弹性梁极惯性矩;  $E$  为弹性模量;  $f$  为中心台与弹性梁连接处所受反作用力;  $m$  为中心台与弹性梁连接处所受反作用力矩;  $y$  为  $C$  点最大变形;  $\theta$  为端截面转角。解此方程组得  $C$  端受力情况为:

$$\begin{cases} m = \frac{M(3l^2d + 4l^3)}{2(3l^2d + 3ld^2 + 4l^3)} \\ f = \frac{M}{d} - \frac{M(3l^2d + 4l^3)}{3l^2d^2 + 3ld^3 + 4l^3d} \end{cases}$$

由材料力学可知,梁的应变与 FBG 粘贴位置的关系为:

$$\varepsilon_x = \frac{mh}{2EI} - \frac{f(l-x)h}{2EI} \quad (5)$$

式中:  $\varepsilon_x$  为弹性梁任意位置应变;  $h$  为弹性梁厚度;  $x$  为 FBG 粘贴位置;  $l$  为弹性梁长度。

不考虑温度及 FBG 封装影响,由式(2)~(5)可得传感器受水平外力作用时,FBG 中心波长漂移量为:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e) \frac{Fh}{2EI} \left[ \frac{2l^2d + 4l^3}{2(3l^2d + 3ld^2 + 4l^3)} - \left( \frac{1}{d} - \frac{3l^2d + 4l^3}{3l^2d^2 + 3ld^3 + 4l^3d} \right) (l-x) \right] \quad (6)$$

由式(6)可知,FBG 波长漂移量与受力呈线性变化。

在二维力  $F_{\text{合}} = (F_x, F_y)$  作用下,FBG1、FBG2 的中心波长会发生与两个方向分力相关的漂移。根据 FBG 波长漂移量计算出对应分力,再由各分力矢量合成二维力,  $F_{\text{合}} = (F_x, F_y)$  可表示为:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $F_x$ 、 $F_y$  分别为  $x$ 、 $y$  方向分力;  $A$  为  $2 \times 2$  耦合矩阵。

该二维力传感器不可避免存在维间耦合问题。由文献[21]可知,当传感器受  $x$  方向单维力作用时,  $x$  方向弹性梁表面会发生与 FBG 粘贴位置相关的弯曲变形,应变为  $\varepsilon_x$ ,同时  $y$  方向的弹性梁会发生与 FBG 粘贴位置不相关的扭转变形,其应变为  $\varepsilon_y$ ,故  $x$  方向的耦合误差为:

$$\varphi_{xy} = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = \frac{2EI\varepsilon_y}{h[m - f(l-x)]} \quad (8)$$

由式(8)可知,传感器结构确定,受  $x$  方向单维力作用时,当 FBG 粘贴位置  $x$  变大,  $\varepsilon_x$  变大,而  $\varepsilon_y$  不变,耦合误差  $\varphi_{xy}$  值变小。因此,FBG 应靠近中心台粘贴,可使得本传感器的耦合误差在理论上达到最低。由于传感器结构对称,当传感器受  $y$  方向的单维力作用时,其耦合误差  $\varphi_{yx}$  情况与  $\varphi_{xy}$  相同,故不再赘述。

此外,传感器若受到  $z$  方向的力,  $x$ 、 $y$  方向弹性梁会产生  $z$  方向力载荷影响的应变,分别为  $\varepsilon_{zx}$ 、 $\varepsilon_{zy}$ ,由于弹性体为等强度对称结构,故有  $\varepsilon_{zx} = \varepsilon_{zy} = \Delta\varepsilon$ 。由式(8)可知,传感器受  $z$  方向的力作用时耦合误差变为:

$$\varphi'_{xy} = \frac{\varepsilon_y + \varepsilon_{zy}}{\varepsilon_x + \varepsilon_{zx}} = \frac{\varepsilon_y + \Delta\varepsilon}{\varepsilon_x + \Delta\varepsilon} \quad (9)$$

由式(8)和(10)可得:

$$\Delta\varphi_{xy} = \varphi'_{xy} - \varphi_{xy} = \frac{\varepsilon_y + \Delta\varepsilon}{\varepsilon_x + \Delta\varepsilon} - \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (10)$$

由式(10)对  $\Delta\varepsilon$  求偏导可得:

$$\frac{\partial\Delta\varphi_{xy}}{\partial\Delta\varepsilon} = \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{(\varepsilon_x + \Delta\varepsilon)^2} > 0 \quad (11)$$

由式(11)可知,  $\Delta\varphi_{xy}$  为递增函数,即随  $\Delta\varepsilon$  增大而增大,故  $\Delta\varepsilon = 0$  时,即未受  $z$  方向力作用时,  $\Delta\varphi_{xy}$  达到最小,其最小值为  $(\Delta\varphi_{xy})_{\min} = 0$ ;故当  $\Delta\varepsilon > 0$  时,即当传感器受  $z$  方向力作用时,有:

$$\Delta\varphi_{xy} = \varphi'_{xy} - \varphi_{xy} > 0 \quad (12)$$

由式(12)可知,当受到  $z$  方向力作用时,该二维力传感器  $x$ 、 $y$  两个方向的维间耦合误差会增大。

## 2 仿真分析

本文对传感器弹性体进行静力学分析,弹性体材料为 2A12 硬铝合金,其密度  $\rho = 2.78 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量  $E = 73 \text{ GPa}$ ,泊松比  $\nu = 0.33$ ,屈服强度  $\sigma_s = 325 \text{ MPa}$ 。

由于结构对称,  $x$ 、 $y$  方向受力变形情况相同,只需分析  $x$  方向即可。图3所示为传感器受  $x$  方向单维力  $F_x = 100 \text{ N}$  时的应变结果。经分析可知,当传感器受单维力  $F_x$  作用时,  $x$  方向上的 3、5 号梁受方向相反、大小相同的弯曲变形,  $y$  方向上的 4、6 号梁受方向及大小相同的扭转变形。而 3、5 号梁的极大应变值为  $3.65 \times 10^{-4}$ , 4、6 号梁的极小应变值为  $2.59 \times 10^{-8}$ ,两者相差 4 个数量级,因此,测量  $F_x$  的 FBG1 应粘贴于 3 号梁(5 号梁应变情况与

其相同)上表面。

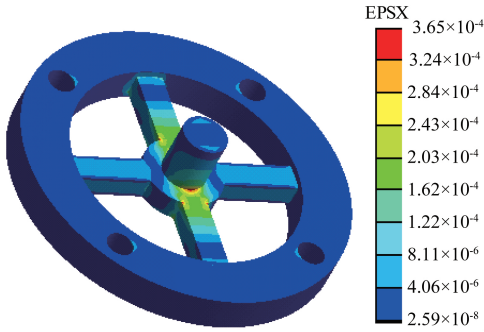


图3  $F_x = 100\text{ N}$  应变云图

Fig.3 The strain cloud diagram for  $F_x = 100\text{ N}$

为了确定 FBG1 的准确粘贴位置,需要分析 3 号梁上表面的应变与中心台距离的映射关系。以中心台底面圆心为坐标原点,将路径设置于 3 号梁上表面,长度为梁长,传感器受力作用时,将 3 号梁上表面的应变情况映射到路径上。对传感器  $x$  方向加载不同大小的力,以 10 N 为步长从 0 N 加载至 100 N,得到不同加载情况下,不同位置的应变曲线,如图 4 所示。

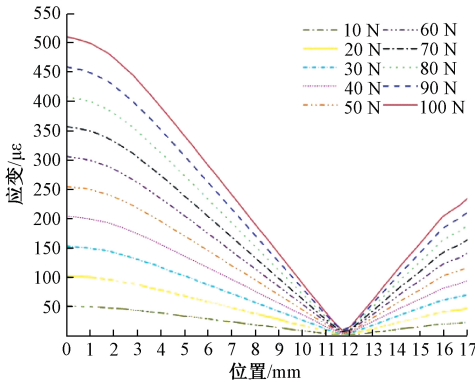


图4 弹性梁表面应变分布曲线

Fig.4 Surface strain distribution curves of elastic beam

由图 4 可知,弹性梁表面应变靠近中心台处最大,为了获得最大检测灵敏度,FBG1 应粘贴于 3 号梁上表面靠近中心台处,粘贴区间为 1~10 mm,同时,测量  $F_y$  的 FBG2 粘贴于 4 号梁上表面靠近中心台处,粘贴区间与 FBG1 相同。

## 3 实验研究

### 3.1 FBG 传感器制备

本文传感器的 4 个梁组件、中心台及外圆环体采用一体加工而成,以降低重复性误差,如图 5 所示。由于 FBG 线径很小,质脆、易折、易断,故必须对 FBG 进行保

护性封装。为避免 FBG 与应变梁表面粘贴不均,而导致 FBG 产生“啾啾现象”<sup>[22]</sup>,梁组件各表面用砂纸打磨平滑;然后,将乙醇清洗后的两根 FBG 分别用聚氨酯类粘合剂固定一端,另一端进行预拉紧后,再用聚氨酯类粘合剂固定,解决环氧树脂 AB 胶与金属材质粘结力不足的问题,从而提高 FBG 的稳定性<sup>[23]</sup>;最后,采用环氧树脂 AB 胶沿着应变梁上表面中心线,将 FBG 封装于应变梁。两个 FBG 的中心波长分别为 1 563. 895, 1 563. 044 nm。

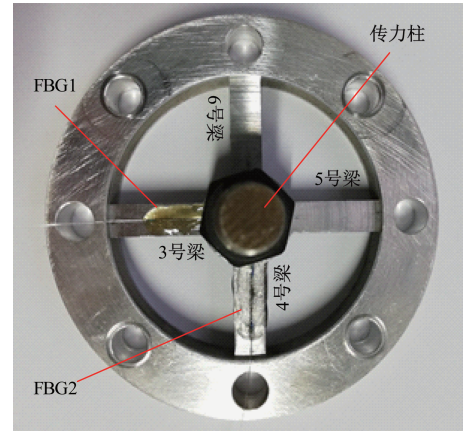


图5 FBG 传感器实物

Fig.5 FBG sensor

### 3.2 FBG 传感器力标定系统

FBG 传感器标定系统主要由 FBG 传感器、解调系统及加载系统组成,如图 6 所示。

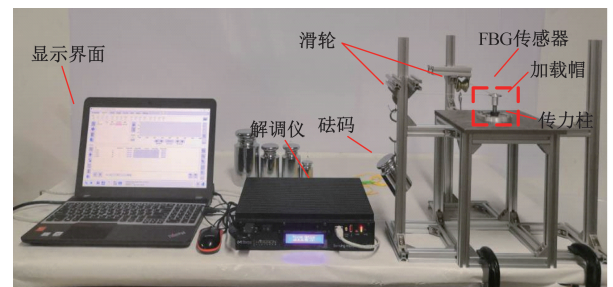


图6 FBG 传感器标定系统

Fig.6 FBG sensor calibration system

加载系统采用砝码加载,该方法操作简单、易稳定。砝码材质为钢镀铬、M1 级精度;钢丝绳线径为 0.6 mm,最大承重 25.3 kg。解调系统采用美国 MOI 公司开发的 FBG 解调仪,其解调精度可达 1 pm,以实现 FBG 中心波长的解调。

### 3.3 FBG 传感器力标定实验

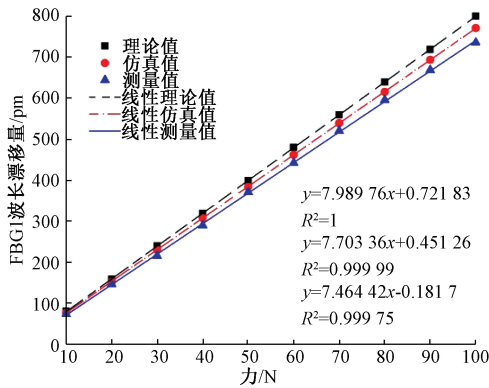
本次实验为了研究 FBG 二维力传感器各分量  $F_x$ 、 $F_y$  方向的线性度、灵敏度及其耦合误差,并通过往复 3 次加

载、卸载实验,测定传感器的重复性误差。

具体标定方法以图 6 所示加载  $x$  方向力为例,采用砝码以步长 10 N,从 0 N 开始沿着  $x$  轴向施加单维力至 100 N,再以相同步长逐阶卸载至 0 N,这样往复加载卸载 3 次,期间,对于每一次加载卸载的每一个点均需等 FBG 波长稳定后,用数据采集软件记录每个 FBG 的中心波长,并计算出对应点的 FBG 中心波长漂移量。由于  $y$  方向的标定方法与  $x$  方向相同,故不再赘述。

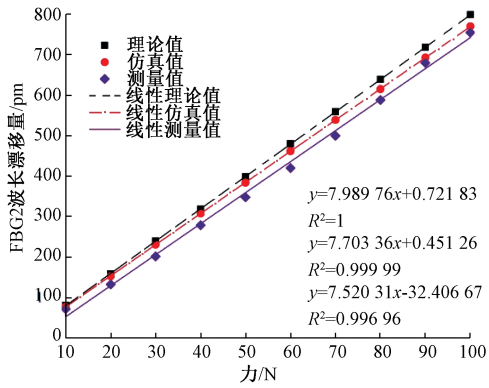
1) 灵敏度分析

图 7 所示为 FBG 传感器两个方向理论曲线、有限元仿真曲线及实验测量曲线对比结果。由图 7 可知,FBG 传感器分别对  $x$ 、 $y$  方向的力的测量基本呈线性关系,且经过线性拟合计算,FBG 传感器  $x$ 、 $y$  方向的线性度分别约为 3%、2%。此外,传感器各方向灵敏度的理论值、仿真值、测量值存在一定的差异,灵敏度对比结果如表 2 所示。



(a)  $F_x$  与 FBG1 波长漂移关系

(a) Wavelength drift relationship of FBG1 vs.  $F_x$



(b)  $F_y$  与 FBG2 波长漂移关系

(b) Wavelength drift relationship of FBG2 vs.  $F_y$

图 7 力与 FBG 中心波长漂移量的关系

Fig.7 Relationship of FBG center wavelength drift vs. force

由表 2 可知,沿  $x$ 、 $y$  方向的波长漂移量对力的灵敏度分别约为 7.464、7.520  $\text{pm}/\text{N}$ ,与文献 [14] 中的 0.265  $\text{pm}/\text{N}$  相比,提高了约 27 倍。此外,实验值与仿真

值分别相差 3.10%、2.38%;而仿真值与理论值两个方向均相差 3.59%。对比结果表明,理论值、仿真值、测量值的灵敏度相差不大,验证了理论计算模型的准确性,但三者呈递减变化。误差主要来源:对于测量值小于仿真值,仿真忽略了环氧树脂 AB 胶的应变传递效率及环境温度的影响;理论计算忽略了未加载力方向的应变梁所受到的微小的扭矩影响。

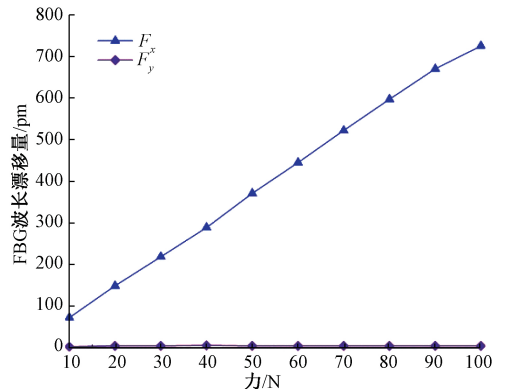
表 2 灵敏度对比结果

Table 2 Sensitivity comparison result  $\text{pm} \cdot \text{N}^{-1}$

方向	理论值	仿真值	测量值	理论误差	仿真误差
$x$	7.990	7.703	7.464	0.526	0.239
$y$	7.990	7.703	7.520	0.470	0.183

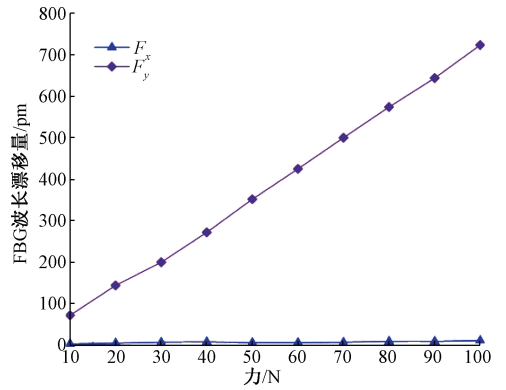
2) 维间耦合分析

图 8 所示为 FBG 传感器两个方向之间的耦合情况。



(a) 加载单维力  $F_x$

(a) Loading single-dimensional force  $F_x$



(b) 加载单维力  $F_y$

(b) Loading single-dimensional force  $F_y$

图 8 FBG 传感器维间耦合分析

Fig.8 Inter-dimensional coupling analysis diagram of FBG sensor

将图 8 中数据分别代入式(7),计算出耦合矩阵  $A$  为:

$$A = \begin{bmatrix} 7.745 & 0.078 \\ 0.016 & 7.343 \end{bmatrix} \quad (13)$$

由式(13)可知,FBG传感器两个方向  $x$ 、 $y$  的耦合误差分别约为 1.01%、0.218%, 小于文献[18]中的  $F_x$ : 4.045%,  $F_y$ : 1.279%。结果表明,该传感器具有较好的弱耦合性,最大耦合误差出现在  $x$  方向,同时,多维力传感器的维间耦合干扰存在于传感器各个方向上,主要取决于传感器结构设计、加工误差及 FBG 粘贴位置误差。

3) 重复性分析

图9所示为FBG传感器往复加载卸载3次的实验结果。

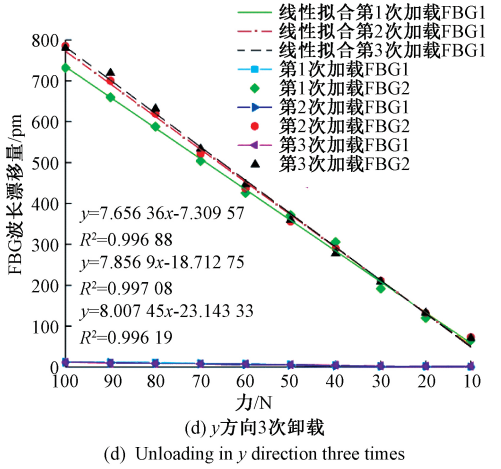
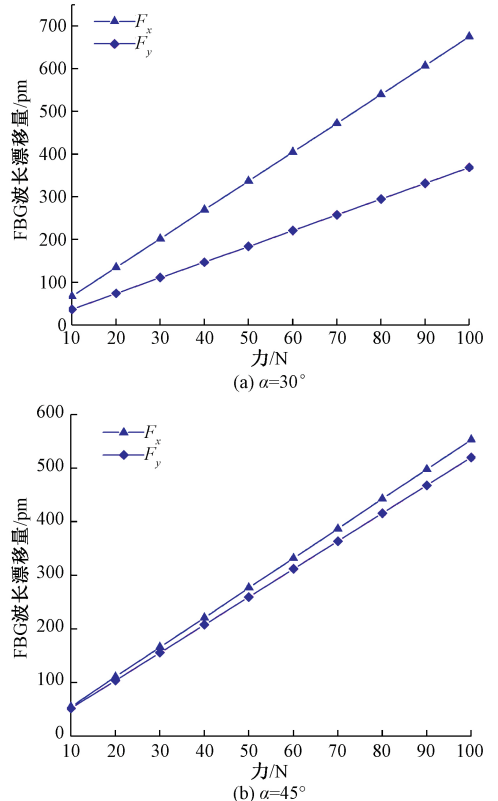
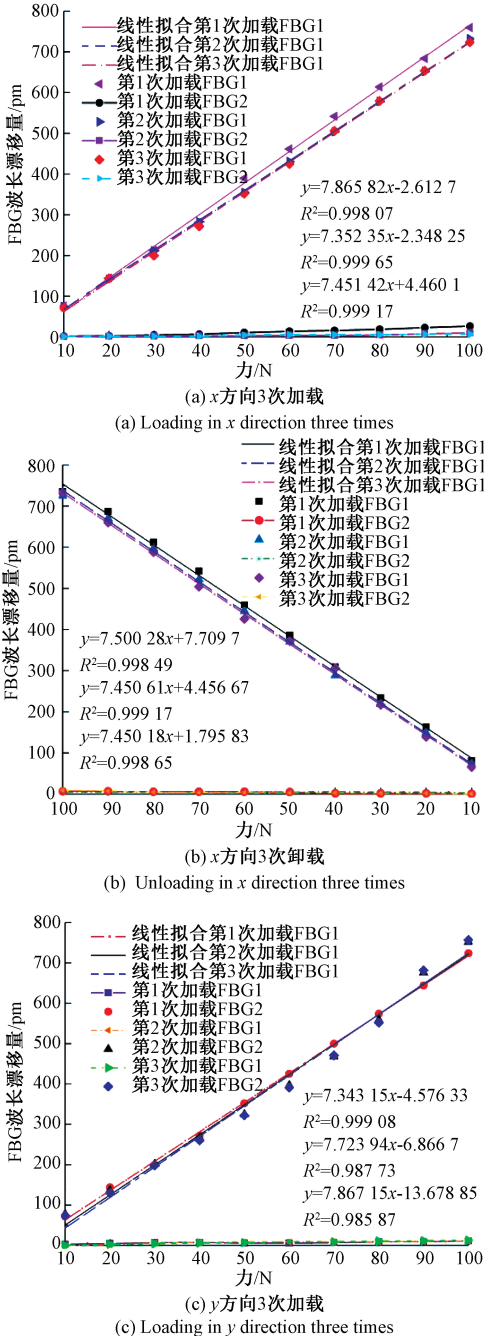


图9 3次加载卸载FBG传感器中心波长漂移情况  
Fig.9 The central wavelength drift of the FBG sensor for loading and unloading three times

经分析可知,传感器  $x$ 、 $y$  方向的重复性误差分别约为 4.898%、5.828%。结果表明,该传感器具有较好的重复性,其最大重复性误差存在于  $y$  方向。误差主要来源于传感器的加工及实验操作不能保证完全一致。

4) 二维力加载实验

为了研究本传感器对二维平面任意方向力的测量精度。本实验以力载荷与  $x$  轴正方向成  $\alpha$  角为加载力的方向角,分别对  $\alpha$  为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $60^\circ$  进行加载实验,其结果如图10所示。



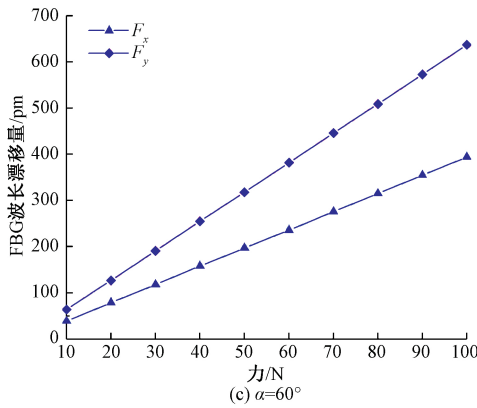


图 10 不同方向加载结果

Fig.10 Loading results for different directions

将图 10 中的数据分别代入到式(6)中,计算得到不同方向的加载力在传感器  $x$ 、 $y$  方向上的力分量,再通过力学矢量合成,得到二维平面内力的误差关系如图 11 所示,方向角误差关系如图 12 所示。

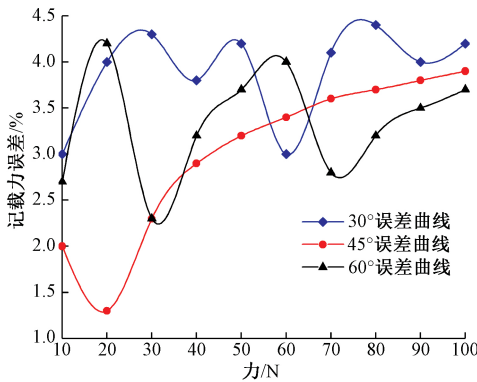


图 11 力的误差关系

Fig.11 Force error relationship diagram

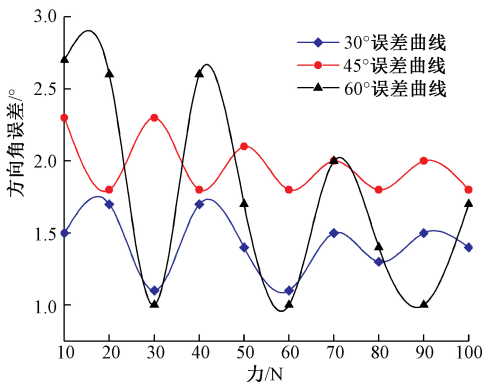


图 12 方向角的误差关系

Fig.12 Directional angle error relationship diagram

由图 11 可知,当加载方向为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $60^\circ$  时,其加载力的最大误差分别为 4.4%、3.9% 和 3.7%;最小误差分别为 3.0%、1.3% 和 2.3%;平均误差分别为 3.9%、3.0% 和 3.3%。由此可知,当加载方向为  $30^\circ$  时,传感器在二维平面对力的大小测量最大误差为 4.4%。由图 12 可知,方向角  $\alpha$  为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $60^\circ$  时,其最大角度误差分别为  $1.7^\circ$ 、 $2.3^\circ$  和  $2.7^\circ$ ;最小角度误差分别为  $1.1^\circ$ 、 $1.8^\circ$  和  $1.0^\circ$ ;平均误差分别为  $1.4^\circ$ 、 $2.0^\circ$  和  $1.8^\circ$ 。由此可知,当加载方向为  $60^\circ$  时,传感器在二维平面对方向角的测量最大误差为  $2.7^\circ$ 。

### 4 结 论

本文设计了一种基于光纤光栅的二维力传感器,FBG 传感器实验结果表明, $x$  方向非线性误差最大,约为 3%; $x$  方向灵敏度最低,约为  $7.464 \text{ pm/N}$ ;  $x$  方向维间耦合误差最大,约为 1.010%; $y$  方向重复性误差最大,约为 5.828%;传感器对二维力的测量最大误差为 4.4%,角度最大误差为  $2.7^\circ$ 。该传感器具有较好的线性度、较高的灵敏度、较弱的耦合干扰及较好的重复性。本文设计传感器可以根据搬运、抛光打磨机器人的实际工作需求灵活改变弹性体外形尺寸,将传感器安装于机器人腕部,在不影响机器人运动性能的情况下实现对机器人的力反馈控制。

### 参考文献

[ 1 ] CHEN S Y, WANG J R, KAZANZIDES P. Integration of a low-cost three-axis sensor for robot force control [ C ]. 2018 Second IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC), 2018: 246-249.

[ 2 ] 赵延治, 焦雷浩, 牛智, 等. 机械解耦自标定并联六维力传感器设计及仿真 [ J ]. 中国机械工程, 2017, 28(7): 771-778.

ZHAO Y ZH, JIAO L H, NIU ZH, et al. Design and simulation of mechanically decoupled self-calibrating parallel six-dimensional force sensor [ J ]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(7): 771-778.

[ 3 ] 荣伟彬, 王家畴, 赵玉龙, 等. 基于 MEMS 技术的微操作三维力传感器研究 [ J ]. 仪器仪表学报, 2007, 28(4): 692-698.

RONG W B, WANG J CH, ZHAO Y L, et al. Research on micro-manipulated 3D force sensor based on MEMS technology [ J ]. Journal of Instrumentation, 2007, 28(4): 692-698.

[ 4 ] 韩康, 陈立恒, 李行, 等. 高灵敏度大量程六维力传

- 感器设计[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9): 61-69.
- HAN K, CHEN L H, LI X, et al. Design of high-sensitivity large-range six-dimensional force sensor [J]. Journal of Instrumentation, 2019, 40(9): 61-69.
- [5] SUN Y J, LIU Y W, ZOI T, et al. Design and optimization of a novel six-axis force/torque sensor for space robot[J]. Measurement, 2015, 65:135-148.
- [6] HU SH SH, WANG H Y, WANG Y, et al. Design of a novel six-axis wrist force sensor [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2018, 18(9): 1-17.
- [7] 杨双龙, 徐科军, 舒张平, 等. 应变式多维力传感器的故障诊断方法与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(9): 1361-1371.
- YANG SH L, XU K J, SHU ZH P, et al. Fault diagnosis method and implementation of strain multidimensional force sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2016, 30 (9): 1361-1371.
- [8] 陈望隆, 杨述焱, 胡权, 等. 面向运动力学测量的无线六维力传感器 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 129-136.
- CHEN W L, YANG SH Y, HU Q, et al. Wireless six-dimensional force sensor for motion mechanics measurement [J]. Journal of Instrumentation, 2019, 40 (4): 129-136.
- [9] 许德成, 郭小辉. 用于仿生皮肤的电容式三维力触觉感知系统[J]. 吉林大学学报, 2015, 33(6): 652-657.
- XU D CH, GUO X H. Capacitive 3D force tactile sensing system for bionic skin [J]. Journal of Jilin University, 2015, 33 (6): 652-657.
- [10] LI Y J, YANG C, WANG G C, et al. Research on the parallel load sharing principle of a novel self-decoupled piezoelectric six-dimensional force sensor [J]. ISA Transactions, 2017, 70: 447-457.
- [11] SHI CH Y, LI T L, REN H L. A millinewton resolution fiber Bragg grating-based catheter two-dimensional distal force sensor for cardiac catheterization[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(4): 1539-1546.
- [12] GUO Y X, KONG J Y, LIU H H, et al. Design and investigation of a reusable surface-mounted optical fiber Bragg grating strain sensor [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(23): 8456-8462.
- [13] 刘胜春, 姜德生, 郝义昶. 光纤光栅测力传感器的研究及应用[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2006, 30(2): 209-211.
- LIU SH CH, JING D SH, HAO Y K. Research and application of fiber Bragg grating force sensor[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering), 2006, 30(2): 209-211.
- [14] 蒋奇, 宋金雪, 高芳芳, 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.
- JIANG Q, SONG J X, GAO F F, et al. Research on multi-dimensional force sensing technology of robot based on fiber gratings [J]. Optoelectronics · Laser, 2014, 25 (11): 2123-2129.
- [15] 仲志成, 赵斌, 林君, 等. 基于光纤传感技术的三维地应力传感器[J]. 光学精密工程, 2018, 26(2): 325-335.
- ZHONG ZH CH, ZHAO B, LIN J, et al. Three dimensional in-situ stress sensor based on optical fiber sensing technology [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(2): 325-335.
- [16] GUO Y X, KONG J Y, LIU H H, et al. A three-axis force fingertip sensor based on fiber Bragg grating [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 249: 141-148.
- [17] 许会超, 苗新刚, 汪苏, 等. 一种机器人多维光纤光栅力传感器 [J]. 上海交通大学, 2016, 50(12): 1881-1884.
- XU H CH, MIAO X G, WANG S, et al. A multidimensional fiber grating force sensor for robots[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016, 50(12): 1881-1884.
- [18] XIONG L, JIANG G ZH, GUO Y X, et al. A three-dimensional fiber Bragg grating force sensor for robot[J]. IEEE Sensors Journal, 2018: 1-8.
- [19] 黄平. 长周期光纤光栅谐振波漂移规律研究[J]. 激光技术, 2012, 36(5): 674-676.
- HUANG P. Study on the law of resonance wave drift of long period fiber grating [J]. Laser Technology, 2012, 36 (5): 674-676.
- [20] 钱牧云, 余有龙, 李慧, 等. 基于光纤光栅的机械手指触觉传感研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 36(4): 730-736.
- QIAN M Y, YU Y L, LI H, et al. Research on the



- sensory touch sensing of mechanical fingers based on fiber Bragg gratings [J]. *Journal of Instrumentation*, 2016, 36(4): 730-736.
- [21] 刘鸿文.材料力学[M].北京:北京高等教育出版社, 2011.
- LIU H W. *Mechanics of materials* [M]. Beijing: Beijing Higher Education Press, 2011.
- [22] 封淑青,熊克,卞侃,等.正弦形构造的光纤光栅自致啁啾效应[J].*光谱学与光谱分析*, 2017, 37(1): 283-286.
- FENG SH Q, XIONG K, BIAN K, et al. Self-induced chirping effect of fiber grating with sinusoidal structure[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(1): 283-286.
- [23] 宋世德,张作才,王晓娜.光纤布拉格光栅水下钢筋腐蚀传感器[J].*电子测量与仪器学报*, 2017, 31(7): 1002-1008.

SONG SH D, ZHANG Z C, WANG X N. Fiber Bragg grating underwater rebar corrosion sensor[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2017, 31(7): 1002-1008.

### 作者简介



孙世政(通信作者),2015年于合肥工业大学获得博士学位,现为重庆交通大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为精密仪器与机械、智能传感技术。

E-mail:ssz091011@163.com

**Sun Shizheng** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2015. Now, he is an associate professor and M.Sc. supervisor in Chongqing Jiaotong University. His main research interest includes precision instrument and machinery, and smart sensor technology.