

文章编号 1004-924X(2024)17-2718-14

基于应变增敏的双层十字型 FBG 触觉感知单元

孙世政*, 何江, 秦鸿宇, 徐向阳, 陈仁祥
(重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074)

摘要: 触觉感知是仿生智能感知的重要内容, 为了提高光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)触觉感知灵敏度, 结合机器手指尖触觉感知需求, 提出了一种应变增敏的 FBG 触觉感知单元。基于应变增敏机理和触觉感知机理分析, 设计了一种基于应变增敏的双层十字型 FBG 触觉感知单元, 采用刚性球型多点增压结构进行应变增敏。利用仿真分析方法优化了 FBG 空间分布, 并对感知单元进行了静力学和热力学仿真。最后搭建了触觉感知实验平台, 结合机器手完成了温度-力触觉协同感知实验。仿真和实验结果表明, FBG₁ 和 FBG₂ 的力触觉感知灵敏度分别为 18.069 nm/MPa 和 1.065 nm/MPa, 温度感知灵敏度为 11.256 pm/°C 和 11.153 pm/°C。该触觉感知单元有效提高了触觉感知灵敏度, 具有良好的线性度和重复性。

关键词: 光纤传感; 光纤布拉格光栅; 应变增敏; 双层十字型; 触觉感知单元

中图分类号: TH741; TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243217.2718

Double-layer cross-type FBG tactile sensing unit based on strain sensitization

SUN Shizheng*, HE Jiang, QIN Hongyu, XU Xiangyang, CHEN Renxiang

(School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University,
Chongqing 400074, China)

* Corresponding author, E-mail: ssz091011@163.com

Abstract: Tactile perception is an important content of bionic intelligent perception, in order to improve the tactile sensitivity of fiber Bragg grating (FBG), combined with the demand of tactile perception of the fingertip of the machine, this paper proposes a strain-enhanced FBG tactile perception unit. Firstly, based on the analysis of strain sensitisation and tactile perception mechanism, a double-layer cross-type FBG tactile sensing unit based on strain sensitisation is designed, and a rigid spherical multi-point sensitisation structure is used for strain sensitisation; Then, the simulation analysis method was used to optimise the FBG spatial distribution and perform hydrostatic and thermodynamic simulations of the sensing unit. Finally, a haptic perception experiment platform was built, and temperature-force haptic synergistic perception experiments were completed in conjunction with a robotic hand. The simulation and experimental results show that the force haptic sensitivity of FBG₁ and FBG₂ are 18.069 nm/MPa and 1.065 nm/MPa, and

收稿日期: 2024-05-20; 修订日期: 2024-07-05.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(No. 52105542); 重庆市自然科学基金创新发展联合基金资助项目(No. CSTB2023NSCQ-LZX0081); 重庆市教育委员会科学技术研究项目(No. KJZD-K202200705); 重庆市技术创新与应用发展专项重大项目(No. CSTB2023TIAD-STX0016)

the temperature sensitivity are 11.256 pm/°C and 11.153 pm/°C. The tactile sensing unit effectively improves tactile sensing sensitivity with good linearity and repeatability.

Key words: optical fiber sensing; Fiber Bragg Grating (FBG); strain sensitisation; double layer cross type; tactile sensing unit

1 引言

触觉感知单元作为机器人感知外界信息的重要部件,直接反映机器人的智能化水平。电学类传感元件如电容式^[1]、压阻式^[2]、压电式^[3]等,已经在触觉感知方面取得较多的研究成果,但仍然存在抗电磁干扰能力较弱、响应速度较慢等问题,难以应用于机器人精细化作业。

光纤布拉格光栅 (Optical Bragg Grating, FBG) 具有体积小、响应速度快、抗电磁干扰能力强等优点,广泛应用于航空航天、医疗、工业以及仿生感知等领域^[4-8]。此外,针对机器人触觉感知领域的 FBG 研究也取得了一定成果^[9]。张剑敏等^[10]设计了便携式触觉感知单元,实现了接触力感知、接触纹理识别和指尖滑动速度检测,力感知灵敏度为 10 nm/MPa。本团队^[11-13]研究开发了基于 FBG 的双层十字型触觉感知单元,实现了触觉力、温度和滑动感知信号检测,力感知灵敏度为 7.289 nm/MPa。Lu 等^[14]针对机器人的手指力触觉感知存在侧向力干扰和应变不均等问题,设计了一种方形孔结构的 FBG 触觉感知单元,手指的加载灵敏度为 27.3 pm/N。虽然现阶段基于 FBG 传感的触觉感知取得了一定的研究进展,但实现精细化感知的灵敏度仍有待提高。

在触觉感知中,针对温度和力感知信号交叉敏感问题,Zhang 等^[15]设计了一种防人假手的 FBG 三维力感知单元,可实现三维力检测并采用参考光栅法进行温度补偿,该结构温度光栅位于手指第二关节,难以避免抓握时应力干扰。Li 等^[16-17]提出了一种金属膜片和悬臂梁结合的 FBG 压力感知单元,两个 FBG 分别粘贴在悬臂梁上下表面,利用差分补偿法进行温度补偿,提高压力灵敏度的同时又避免了温度交叉灵敏度的影响。另外,他们又提出一种基于平面膜片的温度补偿光纤光栅压力感知单元,两种感知单元均难以实现准分布式测量。Jin 等^[18]设计了一种

基于指尖的 FBG 触觉感知单元,两根测力 FBG 间隔 90°封装于圆柱侧面,温度补偿 FBG 位于圆柱上表面,实现法向力、剪切力和接触温度检测,该封装结构尺寸固定,难以适用于不同尺寸的手指触觉感知。现阶段,大多研究采用参考光栅法进行温度补偿解决信号交叉敏感问题,但机器人抓握时压力需要接触式测量,且机器人指尖空间有限,难以布置参考光栅。

综上所述,虽然现阶段基于 FBG 传感的触觉感知研究取得了一定的进展,但存在机器人力触觉感知灵敏度较低的问题。本文设计了一种基于应变增敏的双层十字型 FBG 触觉感知单元,对设计的感知单元进行了应变增敏机理和触觉感知机理分析,并采用有限元分析进行了感知单元空间分布优化和静力学、热力学仿真分析。最后,制作感知单元和搭建实验平台,对感知单元的温度和力触觉感知特性进行了研究并对实验结果进行了重复性分析。

2 原理

FBG 利用其有效折射率和光栅周期对外界参量的敏感特性,将待测参量的变化转化为光栅中心波长漂移量^[19]。如图 1 所示,当入射宽带光透过光纤时,根据光纤耦合模理论,只有满足布拉格波长条件的光波会被有效地反射,FBG 的中心波长表达式如下:

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

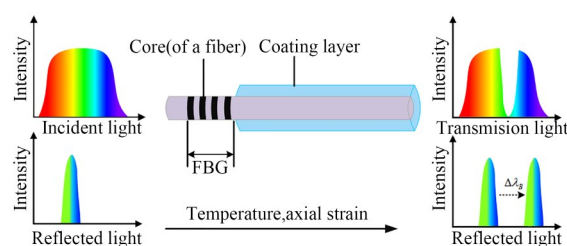


图 1 光纤布拉格光栅传感原理

Fig. 1 Fiber Bragg grating sensing principle

式中: λ_B 为中心波长, n_{eff} 为纤芯有效折射率, Λ 为光栅周期。

由式(1)可知, FBG 的中心波长受纤芯有效折射率和光栅周期两个因素的影响; 在外界环境中, 温度 T 、轴向应变 ϵ_z 等物理量是引起有效折射率和光栅周期产生变化的主要因素。FBG 中心波长漂移可表示为:

$$\Delta\lambda_B = 2\Lambda\Delta n_{\text{eff}} + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda = (1 - P_e)\epsilon_z\lambda_B + (\alpha + \xi)\Delta T\lambda_B, \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为中心波长漂移量, Δn_{eff} 为纤芯有效折射率变化量, $\Delta\Lambda$ 为光栅反射周期变化量, ϵ_z , ΔT 分别为轴向应变和温度变化量, P_e 为弹光系数 (一般硅制光纤介质中 $P_e = 0.22$), α 为光纤的膨胀系数, ξ 为光纤的热光系数。

3 结构设计

3.1 感知单元阵列设计

触觉感知单元结构如图 2 所示, 该结构利用 4 个刚性球型增压体强化 FBG₁ 的力触觉感知, 实现压力增敏, 利用不锈钢管封装 FBG₂ 实现温度补偿。

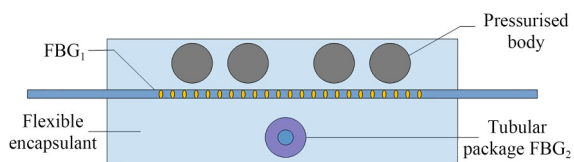


图 2 感知单元柔性封装示意图

Fig. 2 Schematic diagram of flexible packaging of sensing unit

3.2 应变增敏机理

感知单元加载情况如图 3 所示。在应力作用下, FBG 波长漂移量与应变的关系:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\epsilon_z\lambda_B} = (1 - P_e) = K_e, \quad (3)$$

式中 K_e 为应变灵敏系数。

根据图 3(b), 由理论力学可得传感部位轴向应变 ϵ 以及对应应力为:

$$\epsilon = \frac{(\rho + y)\theta - \rho\theta}{\rho\theta} = \frac{y}{\rho}, \quad (4)$$

$$\sigma = E\epsilon = E\frac{y}{\rho}, \quad (5)$$

式中: ρ 为中性层的曲率半径; θ 为局部弯曲对应的圆心角; y 为 FBG 层与中性层的距离; E 为 FBG 的杨氏模量。

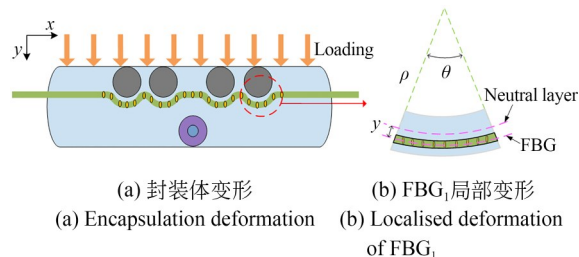


图 3 加载示意图

Fig. 3 Schematic diagram of loading

由弯曲正应力对应关系可得:

$$\begin{cases} \int_A \sigma dA = 0 \\ \int_A y\sigma dA = 0, \\ \int_A ydA = M \end{cases} \quad (6)$$

式中: A 为横截面面积; dA 为微元面积。

将中性层曲率半径用外加载荷表示为:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI_z}, \quad (7)$$

式中: I_z 为材料的惯性矩, M 为弯矩。

由式(6)和式(7)可得弯曲正应力 σ 为:

$$\sigma = \frac{My}{I_z}, \quad (8)$$

$$I_z = \frac{\pi d^4}{64}, \quad (9)$$

式中 d 为圆形截面直径。

由于柔性体表面使用均布载荷加载, 且局部变形可看作简支梁结构, 因此, 其均布载荷所产生的最大弯矩 M_{max} 可表示为:

$$M_{\text{max}} = \frac{ql^2}{8}, \quad (10)$$

式中: q 为外加均布载荷, l 为变形区域长度。

联立式(8)~式(10)可得该结构局部变形弯曲正应变 ϵ 为:

$$\epsilon = \frac{8ql^2y}{E\pi d^4}. \quad (11)$$

将局部变形弯曲应变与 FBG 应变传感理论相结合, 联立式(3)可得柔性封装体下局部力触觉感知原理:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_e \frac{8ql^2y}{\pi d^4 E}, \quad (12)$$

其中: l 为变形长度, d 为圆形截面直径,FBG 距离变形中性层的距离 y 和材料杨氏模量 E 皆为常数。因此令:

$$K_{\tau} = \frac{8yl^2}{\pi d^4 E}, \quad (13)$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_{\epsilon} K_{\tau} q. \quad (14)$$

由于采取多点式增敏机制,FBG 栅区多处存在局部变形情况,反射中心波长漂移存在耦合现象,需要提供经验系数 K_{γ} ,令 $K_{\sigma} = K_{\epsilon} K_{\tau} K_{\gamma}$,可得:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_{\sigma} q. \quad (15)$$

3.3 触觉感知机理

当搭载感知单元的机器手抓握物体时,上层测力光栅 FBG₁会同时检测到应变和温度的变化,而下层测温光栅 FBG₂由于受到刚性封装,主要检测温度的变化。假设 FBG₁的波长漂移量为 $\Delta\lambda_1$,FBG₂的波长漂移量为 $\Delta\lambda_2$,则有:

$$\begin{cases} \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} = K_{\epsilon_1} \epsilon_1 + K_{T_1} \Delta T \\ \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2} = K_{\epsilon_2} \epsilon_2 + K_{T_2} \Delta T \end{cases}, \quad (16)$$

式中: K_{ϵ_1} , K_{ϵ_2} 为 FBG₁和 FBG₂的应变灵敏度系数; ϵ_1 , ϵ_2 为 FBG₁,FBG₂所受的应变值; K_{T_1} , K_{T_2} 为 FBG₁,FBG₂的温度灵敏度系数; λ_1 , λ_2 为 FBG₁,FBG₂的中心波长。

FBG₂由弹性模量为 200 GPa 左右的不锈钢管材封装,理想情况下应该不受应变的影响。然而,由仿真和感知实验结果可知,FBG₂仍然受微小应变的影响,因此,在静态压力感知的基础上结合式(16)得到温度引起的 FBG₂波长漂移量 $\Delta\lambda_{T_2}$ 为:

$$\frac{\Delta\lambda_{T_2}}{\lambda_1} = \left(K_{\epsilon_2} \epsilon_2 - \frac{\Delta\lambda_{\epsilon_2}}{\lambda_2} \right) + K_{T_2} \Delta T, \quad (17)$$

式中: $\Delta\lambda_{\epsilon_2}$ 为 FBG₂静态压力感知实验中 ϵ_2 引起的波长漂移量。由于 FBG₂受应变影响极其小,并且进行了压力补偿,所以式(17)可简化为:

$$\frac{\Delta\lambda_{T_2}}{\lambda_1} = K_{T_2} \Delta T. \quad (18)$$

结合式(16)和式(18)可得应变引起的 FBG₁波长漂移量 $\Delta\lambda_{\epsilon_1}$ 为:

$$\frac{\Delta\lambda_{\epsilon_1}}{\lambda_1} = \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} - \frac{\Delta\lambda_{T_2} K_{T_1}}{\lambda_2 K_{T_2}}. \quad (19)$$

4 仿真分析

4.1 感知单元空间分布优化

本文以五指机器手指尖触觉感知为需求,设计感知单元结构尺寸与机器手指尖一致,如图 4 所示。柔性封装体结构尺寸为 18 mm×18 mm×4 mm,增压体为直径 0.5 mm 圆球,FBG₁外径为 0.120 mm 圆柱,FBG₂不锈钢材料封装外径为 0.5 mm,材料的具体属性如表 1 所示。

通过仿真分析,探究增压体与应变检测 FBG₁不同空间位置分布的受力情况,结合光纤

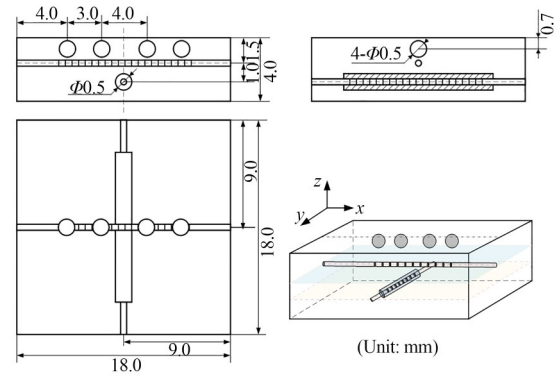


图 4 感知单元尺寸

Fig. 4 Dimensions of sensing unit

表 1 材料属性

Tab. 1 Material properties

Structure	Materials	Young modulus /MPa	Poisson's ratio	Coefficient of thermal expansion /K ⁻¹	Heat transfer coefficient/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
Encapsulated unit	Silicone	5.1	0.49	2.0×10 ⁻⁴	0.3
Pressuriser	Structural steel	2.5×10 ⁵	0.30	4.3×10 ⁻⁵	60.5
FBG	Fibre	5.6×10 ⁴	0.17	1.2×10 ⁻⁵	1.2
Steel pipe	Stainless steels	1.93×10 ⁵	0.31	1.7×10 ⁻⁵	15.1

材料屈服刚度极限与最大应变感知灵敏度,探寻测力 FBG_1 的最佳埋置深度。设置封装基体网格单元体边长为 0.5 mm,网格单元体结构为正六边形,在感知单元上表面中心区域为 6 mm 处施

加 5 N 正向压力,底面做 z 方向全约束,通过调节 FBG_1 埋置深度,得到不同埋置深度情况下封装体的变形云图、 FBG_1 应力云图以及应力与埋置深度关系,如图 5~图 6 所示。

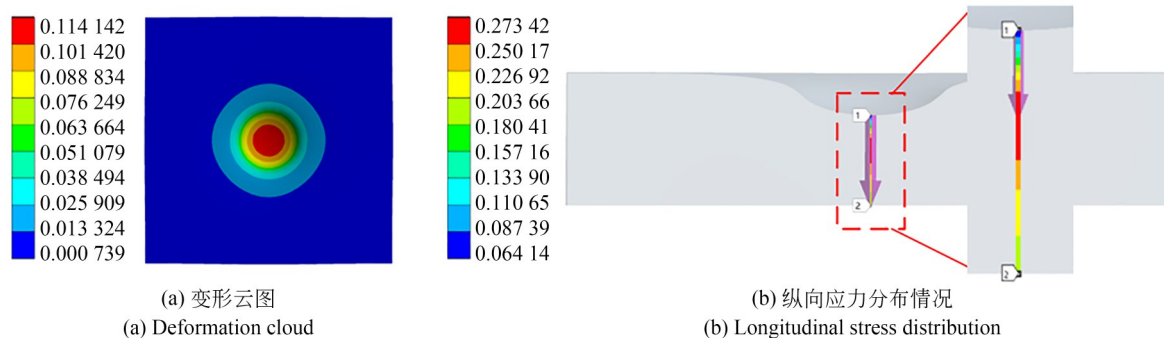


图 5 封装体仿真分析

Fig. 5 Simulation analysis of package body

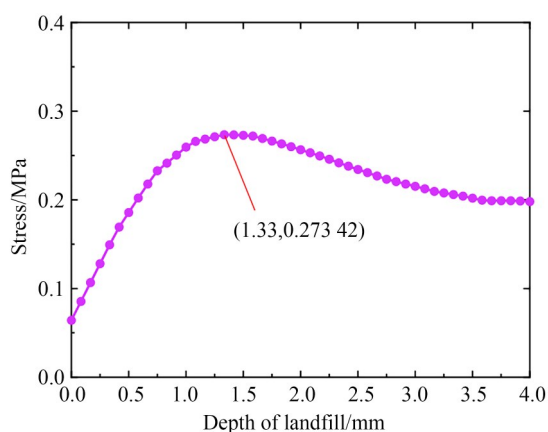


图 6 纵向路径应力曲线

Fig. 6 Longitudinal path stress profile

由图 5(a)可知,在 5 N 正向压力的作用下,柔性体形变向四周扩散,中心区域出现较大变形;由图 5(b)可以看出,在正向外载荷的作用下,在埋置深度 0~4 mm,应力值呈现先增大再减小的趋势。由图 6 可知,应力值在埋置深度为 1.33 mm 处达到最大值,为 0.273 MPa,通过计算得微应变约为 $35\ 000\ \mu\epsilon$,埋置深度为 1.33~4 mm 之间的平均应力值较好,波动较小。因此,考虑到 FBG 和管状封装材料的尺寸,将上层测力 FBG_1 埋置深度设置为 1.5 mm,下层管状封装的测温 FBG_2 埋置深度为 2.5 mm。

4.2 感知单元静力学仿真

为探究感知单元的力触觉感知能力,在封装体上表面施加 1~10 N 的载荷,底面设置 z 轴位移约束,划分柔性体网格为 0.5 mm 的六面体,上层 FBG 为 0.1 mm 的四面体,下层管状封装为 0.2 mm 的六面体,求解感知单元 FBG 的变形云图以及 FBG 波长漂移量与载荷的映射关系,如图 7~图 8 所示。

由图 7 可知,当施加正向压力时,封装体会产生弹性变形,发生等值拉伸的位移形变, FBG_1 和管状封装材料会随封装基体变化而变形;由图 8 可知, FBG_1 和 FBG_2 的波长漂移量与载荷均呈线性关系,力触觉感知灵敏度分别为 $68.698\ 1\ \text{pm/N}$ 和 $4.805\ 9\ \text{pm/N}$,通过压力值计算得到压强敏感系数分别为 $21.203\ 1\ \text{nm/MPa}$ 和 $1.483\ 3\ \text{nm/MPa}$,表明柔性封装且在刚性球型增压体作用下的 FBG_1 对压力感知灵敏度更高,是常见柔性封装 FBG 的 3~4 倍,管状封装 FBG_2 不易受外加载荷干扰。

4.3 感知单元热力学仿真

为探究感知单元的温度感知能力,将上述模型进行热力学仿真分析,设置环境温度为 $0\ ^\circ\text{C}$,稳态热分析模块中设置温度为 $0\sim 100\ ^\circ\text{C}$,步长为 $10\ ^\circ\text{C}$,静力学分析模块中设置传感器底面的位移

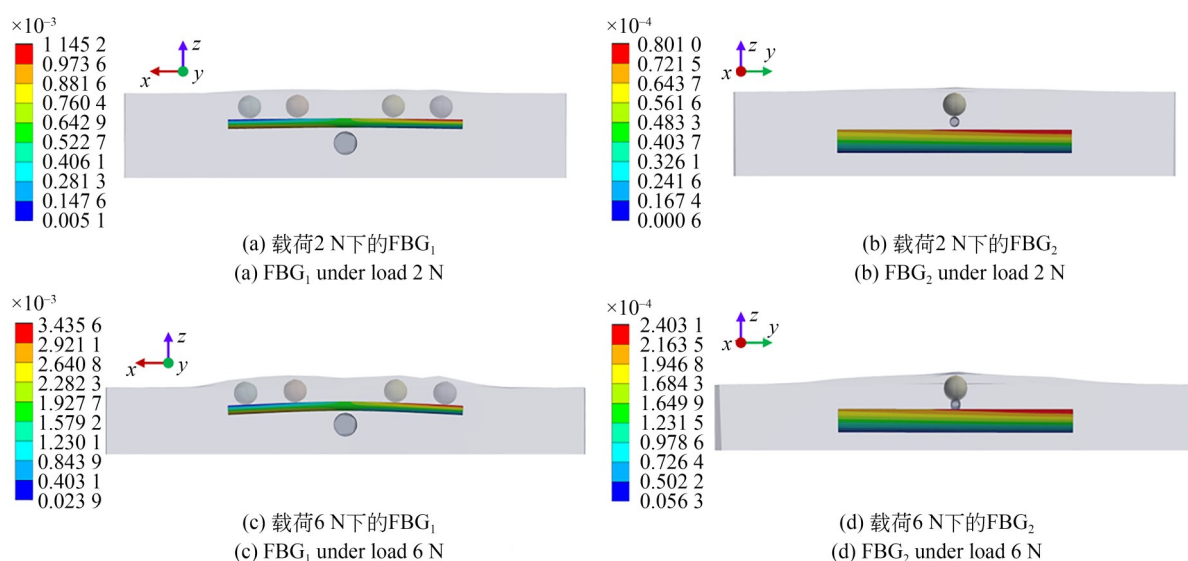


图7 静力仿真变形云图

Fig. 7 Static simulation deformation cloud

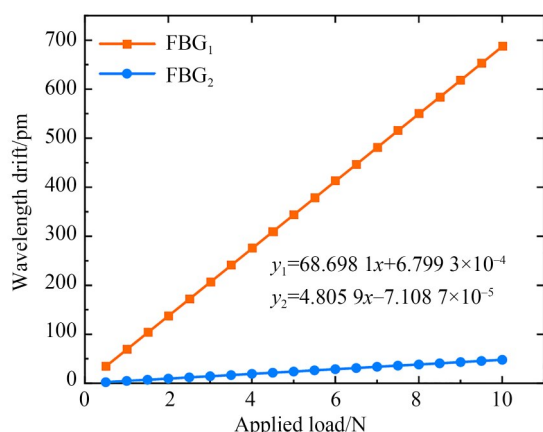


图8 载荷与波长漂移量的映射关系

Fig. 8 Mapping of load to wavelength drift

约束,设置 z 方向位移受限,将稳态热的分析结果作温度载荷导入静力学分析模块,分析FBG变形量,如图9所示。绘制如图10所示的温度-波长漂移量响应曲线。

由图9可知,随着温度的升高,封装体和FBG变形量逐渐增加,从10℃升温到100℃,FBG的最大变形量增加了10倍;从图10可以看出,随着温度的增加,FBG₁和管状封装FBG₂的中心波长均朝正向漂移,通过线性拟合得到FBG温度感知灵敏度分别为13.395 pm/℃和13.042 pm/℃,FBG₂灵敏度略小于上层FBG₁,主要是由于不锈钢管状封装材料的热膨胀系数小于光纤

材料。结合静力学仿真分析可知,该结构中FBG₂能够排除外加载荷的干扰,温度感知灵敏度与上层FBG₁基本保持一致,可实现温度补偿。

5 实验

5.1 感知单元制作

封装基体材料选取与人体泊松比0.49相似的硅胶材料,FBG栅区均为10 mm,中心波长分别为1 560.740 nm和1 534.125 nm,将FBG₂(中心波长为1 534.125 nm)与长度为12 mm的不锈钢毛细管连接,在毛细管两端均匀涂抹353ND环氧树脂胶,静置2 h,使其紧密连接。

感知单元制作流程如图11所示,利用3D打印制作封装模具,模具四边的中心均有0.5 mm宽的凹槽,其深度分别为1.5 mm和2.5 mm;将FBG放入对应深度的凹槽中并拉伸两端使其水平,然后倒入混合AB硅胶溶液至模具刻度位置,放入恒温箱,保持30℃静置24 h;在原模具基础上,将固化剂稍多的混合硅胶溶液倒入第二刻度线,将4个直径为0.5 mm的增压体嵌入对应位置,放入恒温箱中保持40℃静置12 h,使其完全固化定型,最终脱模完成感知单元研制;采用纳米双面胶与硅胶背胶处理剂相结合的方法,有效地将感知单元稳固地粘附在机器人指尖上,FBG感知单元实物如图12所示。

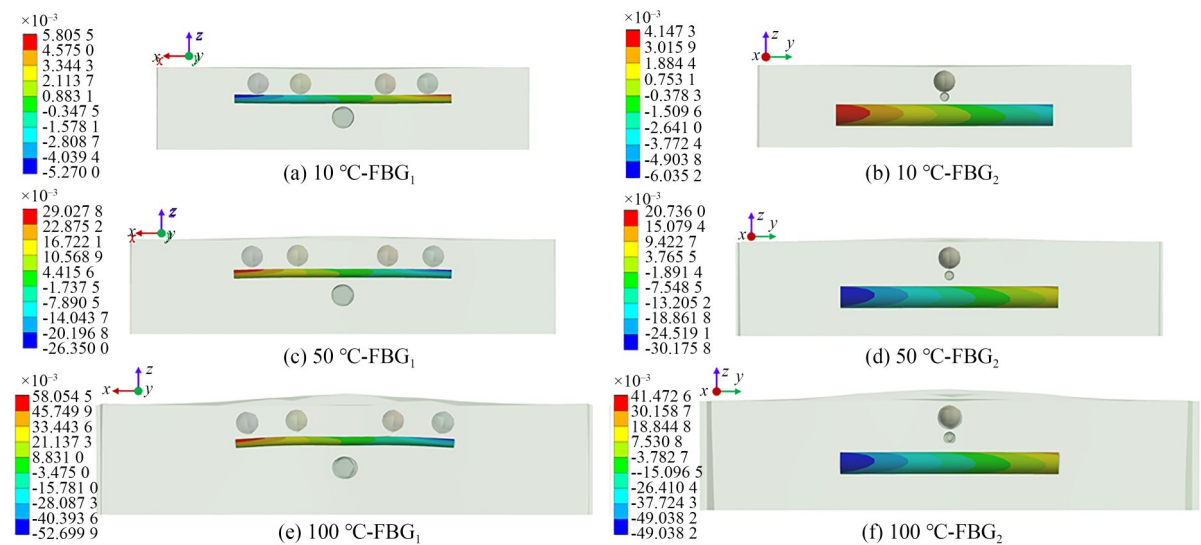


图 9 温度仿真变形云图

Fig. 9 Temperature simulation deformation cloud

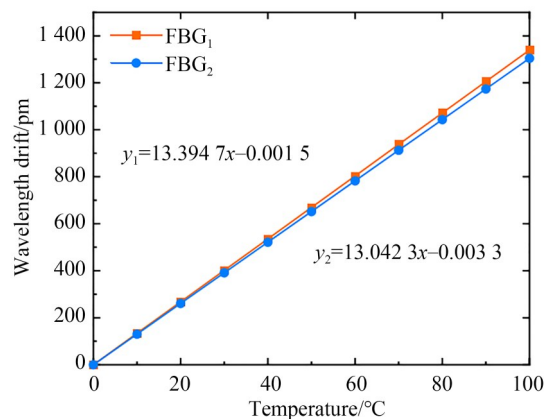


图 10 温度与波长漂移量的映射关系

Fig. 10 Temperature and wavelength drift mapping relationship

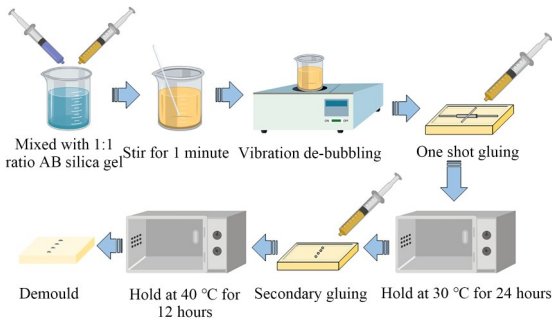


图 11 感知单元制作流程

Fig. 11 Sensor fabrication process

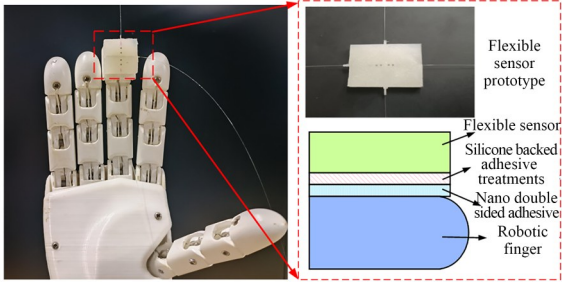


图 12 搭载 FBG 的机器人

Fig. 12 Robots with FBG sensing unit

5.2 感知单元标定实验

搭建触觉标定实验平台如图 13 所示,并对感知单元进行静态压力和静态温度感知实验。

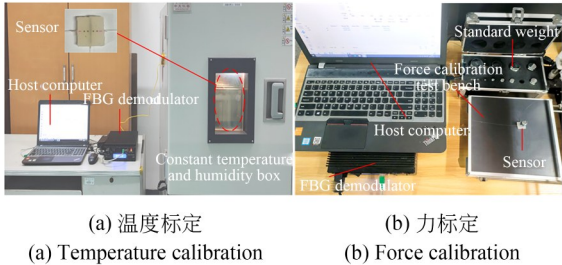


图 13 触觉标定实验平台

Fig. 13 Experimental platform for tactile calibration

5.2.1 静态压力感知实验

利用标准砝码作为外加载荷进行静态压力实验,加载为 0~1 000 g,加载步长为 100 g,每次

加载后稳定 30 s 再记录数据,重复 3 次实验。对实验数据拟合分析,得到载荷与波长漂移量的关系如图 14 所示。

由图 14 可知,静态压力响应曲线具有良好的线性度。实验结果与仿真相似,两根 FBG 对压力敏感度相差较大,当加载为 1 000 g 时,FBG₁最大波长漂移量达 560 pm,FBG₂由于受刚性封装,最大漂移量仅为 39 pm。FBG₁的 3 次实验感知灵敏度分别为 18.086, 17.978, 18.142 nm/MPa,平均力感知灵敏度为 18.069 nm/MPa。FBG₂的 3 次实验感知灵敏度分别为 1.024, 1.079, 1.092 nm/MPa,平均力感知灵敏度为 1.065 nm/MPa。

通过单次实验与 3 组数据平均拟合曲线作对比,进一步分析两根 FBG 的相对误差和重复性

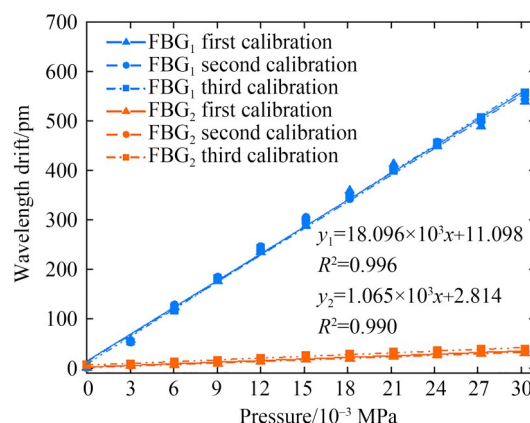
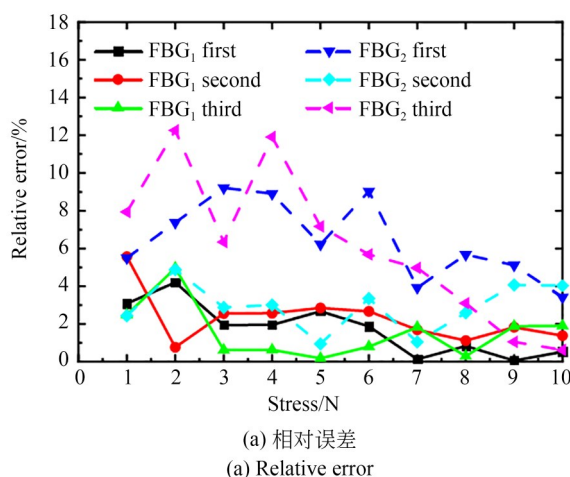


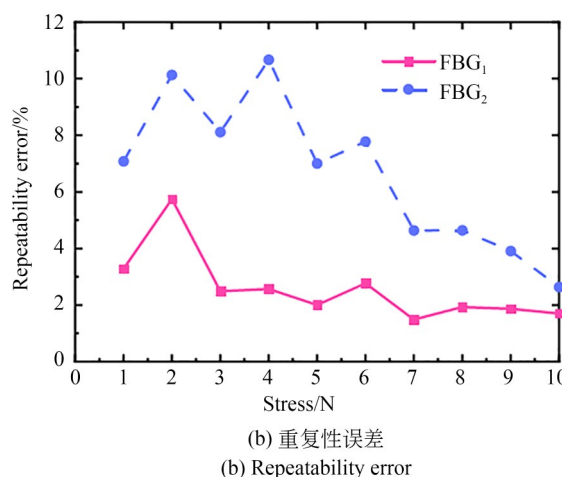
图 14 静态压力响应曲线

Fig. 14 Static pressure response curve

误差,可得静态压力的误差响应曲线,如图 15 所示。



(a) 相对误差
(a) Relative error



(b) 重复性误差
(b) Repeatability error

图 15 静态压力误差分析

Fig. 15 Static pressure error analysis

由图 15(a)可得,FBG₁的相对误差整体较小且大多小于 5%;FBG₂的相对误差整体偏大,但绝大部分误差小于 10%,且随着压力的增大逐渐减小,可能是因为低应变感知受环境噪声影响较大;FBG 的平均相对误差分别为 2.07% 和 4.95%。由图 15(b)可知,FBG₁的重复性误差整体小于 5%,FBG₂的重复性误差同样随着压力的增加逐渐减小,较大点出现在 2 N 和 4 N 测试点,超过了 10%,其余测试点均小于 8%;其中,FBG 的平均重复性误差分别为 2.59% 和 6.66%。由误差分析可得,虽然 FBG₂受环境噪声影响较大,但结合力感知灵敏度从整体结构来

看,FBG₂几乎不受应变影响,且与 FBG₁应变灵敏度相差十倍以上,因此该感知单元符合设计要求。

5.2.2 静态温度感知实验

利用恒温恒湿实验箱进行感知单元静态温度感知实验,实验温度为 0~100 ℃,步长为 5 ℃,从 0 ℃开始逐步升温,之后以同样步长从 100 ℃开始降温。每个温度检测点保持 60 s,记录 30 s,重复 3 次实验,绘制温度响应曲线如图 16 所示。

如图 16 所示,升温、降温响应曲线线性度均大于 0.998,感知单元与温度变化存在良好的线性关系。FBG 3 次实验温度感知灵敏度如表 2 所

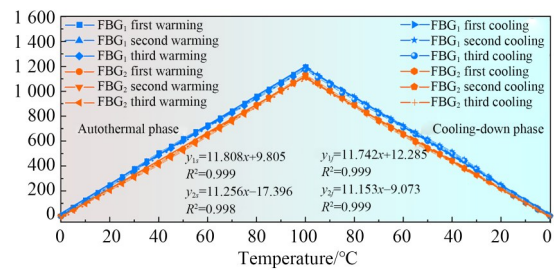


图 16 温度响应曲线

Fig. 16 Temperature response curves

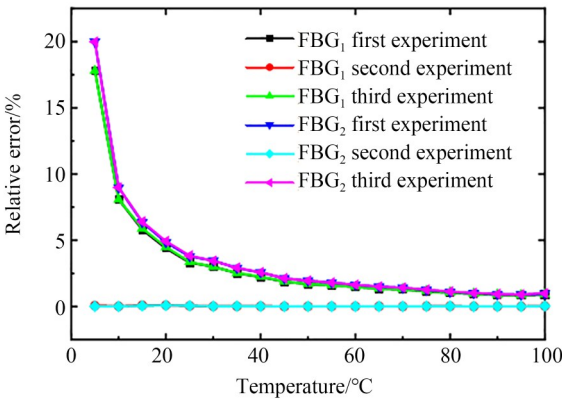
示,FBG 平均升温感知灵敏度为 11.808 pm/°C 和 11.256 pm/°C,平均降温感知灵敏度为 11.742 pm/°C 和 11.153 pm/°C。感知单元对升温 and 降温的温度感知灵敏度相似,FBG₁ 升温和降温灵敏度的相对误差为 0.6%,FBG₂ 升温和降温灵敏度的相对误差为 0.9%。

为了验证感知单元温度感知的精确度和重复性,将 3 次实验数据与平均温度实验数据作对比,分析相对误差和重复性误差,如图 17 所示。

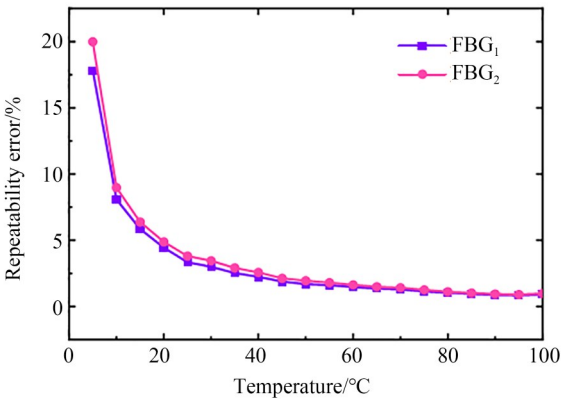
表 2 FBG 温度感知灵敏度

Tab. 2 FBG static temperature sensing sensitivity

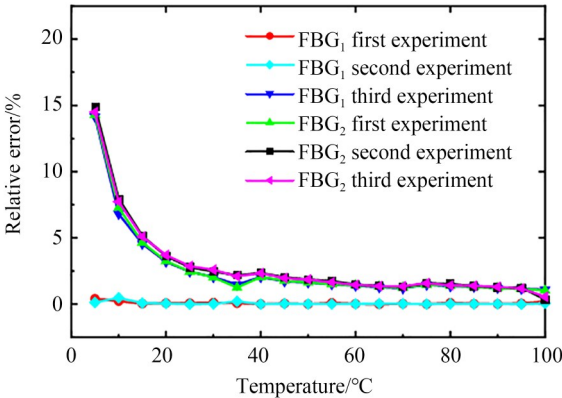
Number of experiments	Warming sensing sensitivity/($\mu\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)		Cooling sensing sensitivity/($\mu\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)	
	FBG ₁	FBG ₂	FBG ₁	FBG ₂
1	11.829	11.282	11.739	11.157
2	11.808	11.257	11.828	11.212
3	11.786	11.228	11.659	11.089
Average value	11.808	11.256	11.742	11.153



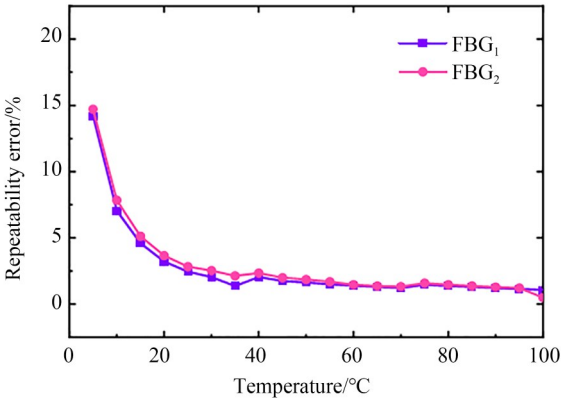
(a) 升温相对误差
(a) Relative warming error



(b) 升温重复性误差
(b) Temperature rise repeatability error



(c) 降温相对误差
(c) Relative error of cooling



(d) 降温重复性误差
(d) Cooling repeatability error

图 17 静态温度误差分析

Fig. 17 Static temperature error analysis

由图 17(a)和 17(c)可知,升温与降温实验中 FBG 的相对误差均随温度增加逐步减少,第二次实验与平均数据相接近,相对误差在 1% 左右;在排除第二次实验情况下,FBG₁和 FBG₂的升温平均相对误差分别为 3.12% 和 3.48%,降温平均相对误差分别为 2.67% 和 2.92%。由图 17(b)和 17(d)可知,升温和降温过程中的重复性误差趋势与相对误差相似,在低于 20 °C 的低温区域整体误差偏大,可能是因为实验开始前封装体未完全静置,20 °C 以上区域重复性误差小于 5%。

5.3 机器人触觉感知实验

搭建接触温度感知和温度-力触觉感知实验平台,如图 18 所示,利用搭载感知单元的机器人开展触觉感知实验。

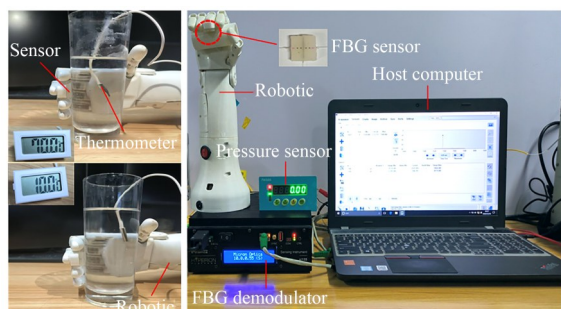


图 18 触觉感知实验平台

Fig. 18 Experimental platform for tactile perception

5.3.1 接触温度感知实验

在静态温度感知实验的基础上,利用搭载 FBG 的仿生机器人开展接触温度感知实验研究。实验平台主要包括仿生机器人、分辨率为 0.1 °C 的温度传感器、传感器样机、FBG 解调仪和上位机等。以装满水的圆柱水杯为抓取对象,利用加热棒和温度计调节水温,利用锡箔纸包裹水杯作保温处理,调控温度为 5~70 °C,以 5 °C 为步长开展实验研究。绘制机器人接触温度和 FBG 波长漂移量的散点图,如图 19 所示。

由图 19 可知,在对传感器进行机器人手接触温度感知实验时,FBG₁和 FBG₂的中心波长漂移量和温度变化呈良好的线性关系;最后,FBG₁的平均接触温度灵敏度为 11.087 pm/°C,FBG₂的平均接触温度灵敏度为 9.142 pm/°C;相较于静态

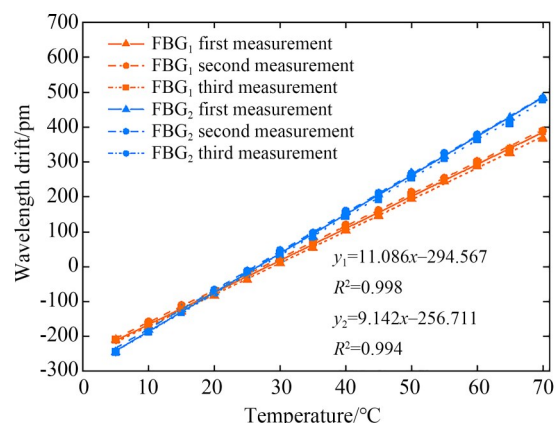


图 19 接触温度响应曲线

Fig. 19 Contact temperature response curve

温度感知实验,FBG₁的温度灵敏系数与静态实验温度灵敏系数接近,误差为 6.1%,而 FBG₂与前者相差较大,误差为 18.1%,分析可能是与封装材料传热效率有关。

5.3.2 温度-力触觉协同感知实验

将压力传感器粘贴于机器人指尖与 FBG 感知单元相邻的位置,与被抓水杯正向接触,通过机器人上位机系统调整抓取力度,压力传感器分辨力为 0.01 N,抓取力为 1~8 N,步长为 1 N;调节水杯温度为 10~70 °C,步长为 10 °C。得到如图 20 所示的 FBG 中心波长漂移量与接触力和温度的映射关系,将接触力和温度分别进行数据整理,得到图 21 和图 22。

由图 20 可知,FBG₁受压力与温度的双重影响,随着压力或温度的提升,中心波长都有明显的正向漂移;而温度感知光栅 FBG₂几乎不受压力影响,不同接触力下的波长漂移量只有微小改变,而受温度影响较大。进一步观察图 21~图 22,两根 FBG 受温度影响均十分明显,FBG₂与压力拟合曲线近乎水平,曲线之间保持相对恒定的间距,通过线性拟合分析得 FBG₁的平均温度灵敏度为 11.255 pm/°C,FBG₂的温度灵敏度为 8.298 pm/°C;FBG₁的力触觉灵敏度为 17.342 nm/MPa;FBG₂的力触觉灵敏度为 1.554 nm/MPa;FBG₂的温度灵敏度相比静态温度感知和接触温度感知的灵敏度均较低,可能是受封装体厚度以及实验条件等因素的影响,在实验中 FBG₂实际感知温度未达到实验记录温度。

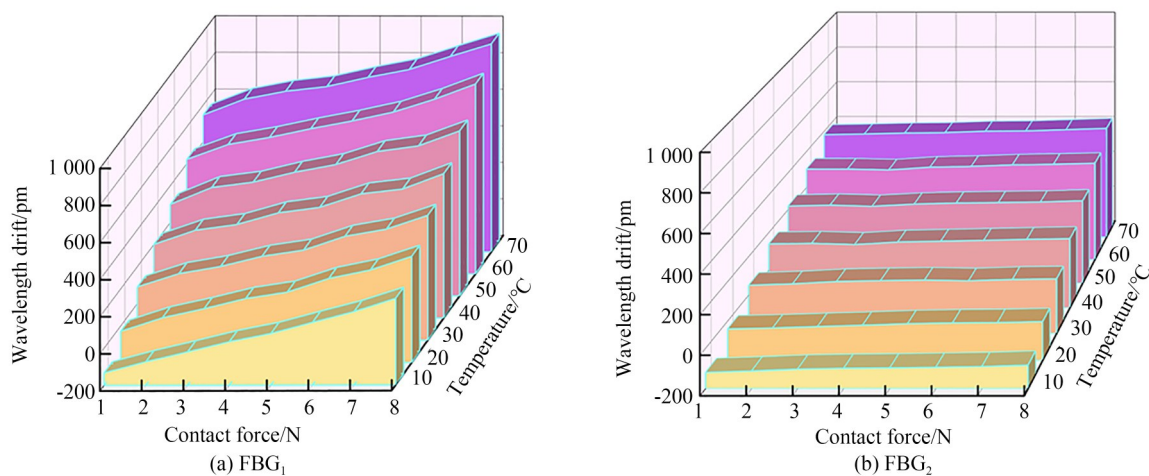


图 20 FBG 波长漂移量与接触力和温度的关系

Fig. 20 FBG wavelength drift versus contact force and temperature

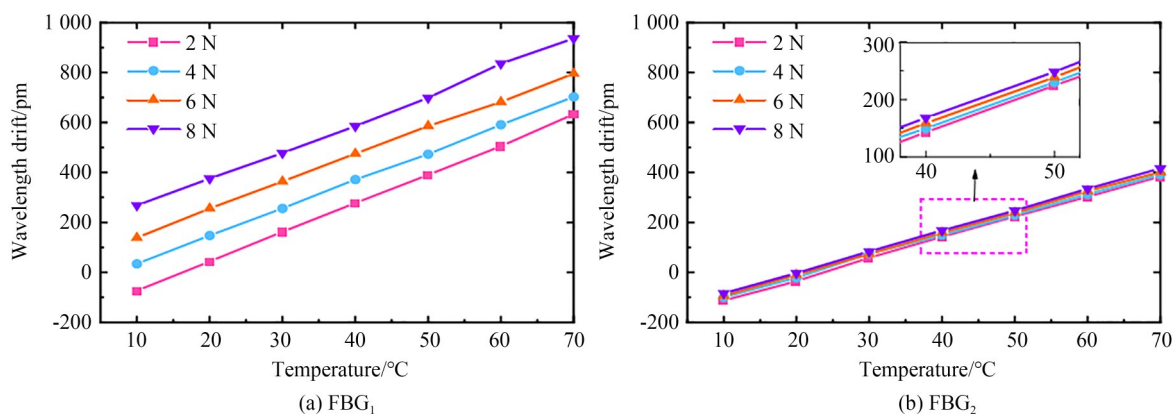


图 21 不同接触力下 FBG 波长漂移量与温度的关系

Fig. 21 FBG wavelength drift versus temperature for different contact forces

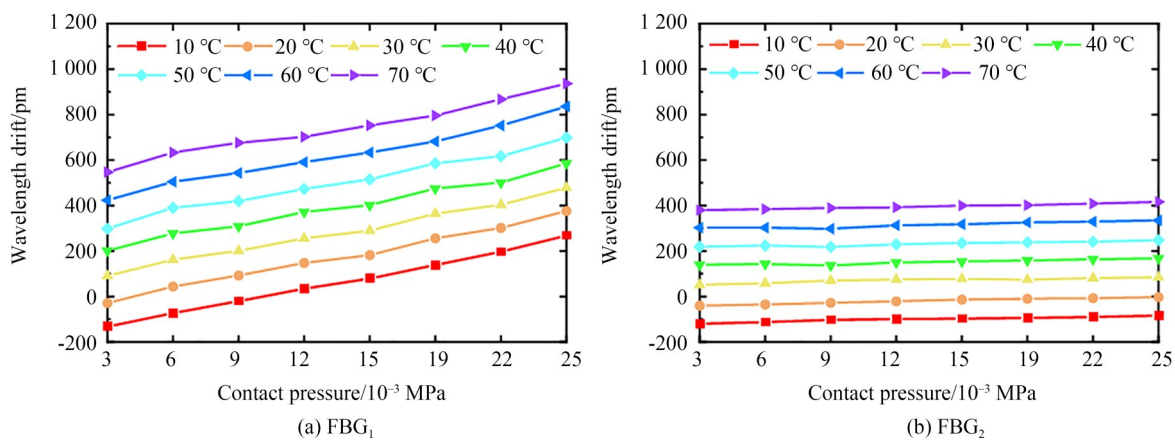


图 22 不同温度下 FBG 波长漂移量与接触力的关系

Fig. 22 FBG wavelength drift versus contact force at different temperatures

基于触觉感知理论,结合静态压力感知实验结果,在协同感知实验中,将 FBG_2 的波长漂移量进行压力补偿,理想化为仅受温度作用的结果,可以计算出 FBG_1 波长漂移量所对应的接触力和温度数值。得到接触温度和接触力的误差情况如图 23 所示。

由图 23 可知,温度误差小于 $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,整体随着温度升高而减小,接触力误差小于 0.5 N ,大部

分聚集在 $0\sim 0.3\text{ N}$ 之间;由于实验条件的限制,在协同感知实验中 FBG_2 温度感知对低温区($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)感测误差较大,导致该结构在低温区时的解算温度误差较大。除了 FBG_2 温度感知灵敏度稍微偏低以外,温度-力触觉协同感知实验结果与标定实验相似,该感知单元不仅实现了机器手指尖触觉感知的温度补偿,而且还有效地提高了 FBG 力触觉感知灵敏度。

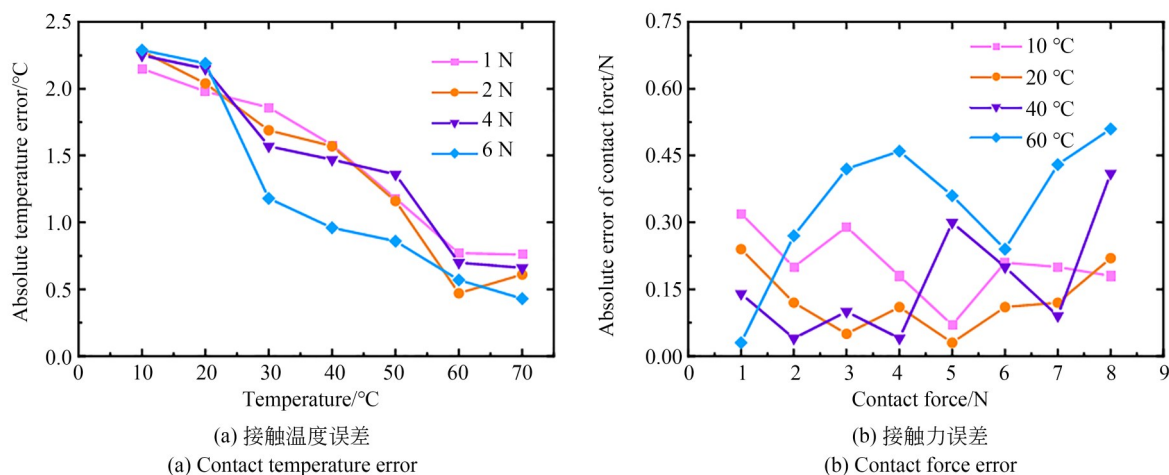


图 23 协同感知实验误差

Fig. 23 Co-awareness experimental errors

6 结 论

本文针对机器手力触觉感知灵敏度较低的问题,设计了一种基于应变增敏的双层十字型 FBG 触觉感知单元,基于应变增敏和触觉感知机理分析开展了有限元仿真分析和感知单元实验研究。实验结果表明,该感知单元具有良好的线性度和重复性, FBG_1 和 FBG_2 的力

触觉感知灵敏度为 18.069 nm/MPa 和 1.065 nm/MPa ,温度感知灵敏度分别为 $11.256\text{ pm/}^{\circ}\text{C}$ 和 $11.153\text{ pm/}^{\circ}\text{C}$,FBG 力触觉感知平均相对误差分别为 2.07% 和 4.95% ,温度感知平均相对误差分别为 2.67% 和 2.92% 。该感知单元具有良好的线性度和重复性,实现温度和力信息检测的同时还有效地提高了触觉感知灵敏度。

参考文献:

- [1] CAO S J, LI R Q, PANAHI S M, *et al.* A flexible and highly sensitive capacitive pressure sensor with microstructured dielectric TPU layer based on mesh fabric as template [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(21): 20276-20284.
- [2] 张蕾,李博,高阳. 压阻式柔性应变感知单元研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(19): 48-58.

- ZHANG L, LI B, GAO Y. Research progress of Piezoresistive flexible strain Sensor [J]. *Materials Review*, 2022, 36(19): 48-58. (in Chinese)
- [3] 罗静静,左晶晶,季仲致,等. 面向脉诊客观化的脉搏感知单元研究综述[J]. 仪器仪表学报, 2021, 41(8): 1-14.
- LUO J J, ZUO J J, JI ZH ZH, *et al.* Review of pulse sensor research for objectivization of pulse diagnosis [J]. *Chinese Journal of Scientific Instru-*

- ment, 2021, 41(8): 1-14. (in Chinese)
- [4] ZHAO F C, LU X L, SHI H B, *et al.* Study on stratified settlement and weak reflectivity fiber grating monitoring of shield tunnel crossing composite strata[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(3): 1769.
- [5] OLIVEIRA L A, SOUSA F B, SOUSA F M, *et al.* Prototype of a sensor for simultaneous monitoring of water level and temperature of rivers in the Amazon using FBG[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2022, 54(11): 731.
- [6] 郭永兴, 张航, 熊丽等. 基于光纤布拉格光栅的扑翼机器人三维扑动变形测量[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(9): 1304-1313.
- GUO Y X, ZHANG H, XIONG L, *et al.* Fiber Bragg grating based 3D flutter deformation measurement of flapping wing robot [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(9): 1304-1313. (in Chinese)
- [7] 张福生, 张雷, 赵阳. 光纤光栅与增量极限学习机的航天器结构重构[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(12): 2964-2973.
- ZHANG F SH, ZHANG L, ZHAO Y. Spacecraft structure reconstruction with fiberbragg grating and incremental extreme learning machine[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(12): 2964-2973. (in Chinese)
- [8] 王庆雷, 孙世君, 姜宏佳, 等. 光学遥感器光机结构热变形的高精度测量[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(8): 948-959.
- WANG Q L, SUN SH J, JIANG H J, *et al.* High-precision thermal deformation measurement of optical remote sensor optical-mechanical structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(8): 948-959. (in Chinese)
- [9] MASSARI L, FRANSVEA G, D'ABBRACCIO J, *et al.* Functional mimicry of Ruffini receptors with fibre Bragg gratings and deep neural networks enables a bio-inspired large-area tactile-sensitive skin [J]. *Nature Machine Intelligence*, 2022, 4(5): 425-435.
- [10] 张剑敏, 熊鹏文, 韦琦, 等. 面向纹理识别的便携式触觉感知单元设计[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(10): 66-73.
- ZHANG J M, XIONG P W, WEI Q, *et al.* Design of portable Tactile sensor for Texture Recognition[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(10): 66-73. (in Chinese)
- [11] 龙雨恒, 孙世政, 党晓圆. 一种十字型阵列的光纤光栅柔性力觉感知单元[J]. *传感技术学报*, 2020, 33(7): 940-944.
- LONG Y H, SUN SH ZH, DANG X Y. A Kind of Fiber Grating Flexible Force Sensor with Cross Array [J]. *Chinese Journal of Sensor Technology*, 2020, 33(7): 940-944. (in Chinese)
- [12] 孙世政, 龙雨恒, 李洁, 等. 基于光纤布拉格光栅的柔性触滑觉复合传感研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(2): 40-46.
- SUN SH ZH, LONG Y H, LI J, *et al.* Research on flexible touch-slip sensing based on fiber Bragg grating [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(2): 40-46. (in Chinese)
- [13] SUN S Z, HE S G, HAN Y, *et al.* Soft bionic skin with touch-slip and thermal perception using double-layer distributed FBG sensing array [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(5): 4096-4105.
- [14] LU G, FU S, ZHU T, *et al.* Research on finger pressure tactile sensor with square hole structure based on fiber Bragg grating[J]. *Sensors*, 2023, 23(15): 6897.
- [15] ZHANG X, WANG Y, LIU H, *et al.* Three-dimensional force detection and decoupling of a fiber grating sensor for a humanoid prosthetic hand[J]. *Optics Express*, 2023, 31(23): 38268-38287.
- [16] LIANG M F, FANG X Q, WU G, *et al.* A fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation based on diaphragm-cantilever structure[J]. *Optik*, 2017, 145: 503-512.
- [17] LIANG M F, Fang X Q, NING Y S. Temperature compensation fiber Bragg grating pressure sensor based on plane diaphragm [J]. *Photonic Sensors*, 2018, 8(2): 157-167.
- [18] JIN K, LI Z, NAN P, *et al.* Fiber Bragg grating-based fingertip tactile sensors for normal/shear forces and temperature detection[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 357: ID 114368.
- [19] 孙世政, 庞珂, 于竞童, 等. 基于白鲨优化极限学习机的三维力传感器非线性解耦[J]. *光学精密*

工程, 2023, 31(18): 2664-2674.

SUN SH ZH, PANG K, YU J T, *et al.* Nonlinear decoupling of three-dimensional force sensor

based on white shark optimal extreme learning machine[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(18): 2664-2674. (in Chinese)

作者简介:



孙世政(1986—),男,山东烟台人,教授,硕士生导师,2015年于合肥工业大学获得博士学位,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