文章编号:1001-5078(2018)04-0509-06

·光纤及光通讯技术 ·

仿生柔性触角形状感知光纤传感方法研究

赵利明,董明利,李 红,孙广开,祝连庆 (北京信息科技大学光电信息与仪器北京市工程研究中心,北京 100016)

摘 要:为解决智能机器人仿生柔性触角形状感知问题,研究柔性光纤传感方法。建立光纤触 觉传感器三维模型,推导出柔性触角探测物体形状的曲率计算公式,建立柔性触角形状传感系 统,实验研究光纤布拉格光栅作为传感元件的可行性,分析柔性仿生触角标定误差,得到仿生 柔性触角弯曲导致光纤光栅中心波长漂移量与形状曲率的关系,拟合曲线与实际曲线之间的 参数偏差小,验证了仿生柔性触角形状光纤传感技术可行性。研究结果表明,光纤传感方法可 实现仿生柔性触角形状感知,在智能机器人领域具有应用前景。

关键词:智能机器人;光纤光栅;触觉传感;三维重构;曲率标定

中图分类号:TN253 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2018.04.017

Research on shape sensing fiber optic sensing method of bionic flexible antenna

ZHAO Li-ming, DONG Ming-li, LI Hong, SUN Guang-kai, ZHU Lian-qing

(Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China)

Abstract: In order to solve the problem of the shape perception of bionic flexible antenna for intelligent robot, the flexible fiber sensing method was studied. Three-dimensional model of fiber tactile sensor was established, and the curvature formula that flexible antenna detected object shape was derived. The flexible antenna shape sensing system was set up, and the feasibility of fiber Bragg grating as sensing element was studied through the experiments. The calibration error of flexible bionic tentacles was analyzed, the relationship of the fiber grating central wavelength drift and shape curvature was gotten, parameter deviation between the fitting curve and the actual curve was small, which verified the feasibility of bionic flexible antenna shape optical fiber sensing technology. The results show that the optical fiber sensing method can realize the shape perception of bionic flexible antennas and has the application prospect in the field of intelligent robot.

Key words: intelligent robot; fiber Bragg grating; tactile sensing; three-dimensional reconstruction; curvature calibration

基金项目:教育部"长江学者与创新团队发展计划"项目(No. IRT_16R07);光电测试技术北京市重点实验室 2017 开放课题(No. GDKF2017006)资助。

作者简介:赵利明(1992-),男,硕士研究生,主要从事光纤传感等方面的研究。E-mail:374636457@qq.com 通讯作者:董明利(1965-),女,教授,博士生导师,主要从事光电与视觉检测、光纤传感与光电器件等方面的研究。 收稿日期:2017-09-21;修订日期:2017-09-28

1 引 言

智能机器人技术已成为当今应用广泛、发展最 令人瞩目的高新技术,其发展越来越受到世界各国 的高度关注。被测物体的信息识别是智能机器人的 重要感知能力。机器人只有在感知物体存在并能够 确定其形状的情况下才能实现智能抓取、跟踪等任 务。不断提高形状检测的精确性、对复杂环境的适 应性以及对目标各种变化的鲁棒性非常必要。通过 仿生触角系统可感知对象物体的材质和形状^[1-3]; 准确探测、识别地形变化,使机器人具备在能见度低 且复杂的环境中进行安全导航的能力,并能确保自 身结构和功能的完整性。

机器人感知物体形状采用的传感器主要包括: 激光传感器、压阻式触觉传感器、电容式触觉传感器 等,但这些传感器在应用中存在若干问题。激光传 感器可以实现无接触远距离测量,但在烟雾等恶劣 环境下无法应用。现有的压阻式、电容式^[4]方法与 柔性材料的相容性差,难以进行准确探测。因此,为 了适应复杂恶劣的环境并与柔性材料兼容,需要研 究有效的柔性传感方法。

光纤传感器具有柔韧可变形、重量轻、体积小、结构简单等、灵敏度高、响应速度快的优点,且在恶劣环境下具有诸如敏感和抗干扰能力强等特性,光纤式触觉传感器在机器人上具有应用前景,但光纤光栅在仿生柔性触角上的研究较少。吴仲台^[5]等人设计了一种光纤光栅形状传感器,并对传感器的封装工艺进行了精度分析。Zhao^[6]等人设计了一种基于光纤光栅的生物晶须阵列,通过对晶须挠度的测量获取物体的距离信息。以上研究为光纤光栅在物体形状感知方面的应用拓宽了基础,但在形状感知过程中传感器弯曲形态的获知方面还欠缺研究。

为了解决这些问题,本文研究一种基于多元光 纤光栅阵列的柔性仿生触角传感方法,主要研究光 纤光栅中心波长漂移量与仿生柔性触角因接触物体 弯曲而产生的曲率之间的关系,验证仿生柔性触角 在形状感知方面的可行性,为复杂物体的形状感知 提供基础。

2 柔性仿生触角结构设计

基于柔性可恢复的设计理念,柔性仿生触角的 基材选取直径为2 mm 钛镍记忆合金丝,于记忆合 金丝的外侧布设三根光纤光栅,且两两间成 120° 角。每根光纤光栅上均匀分布三个栅区,光纤光栅 使用 DP420 高性能粘合剂进行固定。待触觉传感 器封装完毕后,在其外部添加热缩管以达到保护传 感器的目的。这种设计的主要优势是三个不同方向 上的 FBG 测量点相互之间为补偿匹配关系,可以进 行温度补偿和拉伸应力的补偿,如图 1 所示。

当触觉传感器和物体接触或者受到横向压力, 记忆合金丝会产生微小的轴向应变,与此同时,粘合 在其内侧面的 FBG 随之产生相同的应变,使得 FBG 的中心波长发生变化。得知中心波长的漂移量便可 进一步获知 FBG 的曲率变化情况。



图1 柔性仿生触角基础设计

Fig. 1 Basic design of flexible bionic antenna

3 重构算法

3.1 FBG 空间曲率传感

在温度恒定的条件下,FBG 受轴向应变量 ε 的 表达式为:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B (1 - P_e)} \tag{1}$$

当柔杆发生弯曲时,FBG 的弯曲程度产生应变 ε ,导致其反射谱中心波长 λ_B 发生漂移量 $\Delta\lambda_B$,由 公式(1)得出此漂移量 $\Delta\lambda_B$ 与应变 ε 成正比。设栅 区长度为 s,柔杆直径为 d,曲率半径为 ρ ,有:

$$\theta = \frac{s + \Delta s}{\rho + \frac{d}{2}} = \frac{s}{\rho}$$
(2)

推出曲率半径ρ表达式为:

$$\rho = \frac{\lambda_B d(1 - P_e)}{2\Delta\lambda} \tag{3}$$

因此推出曲率半径 ρ 的倒数曲率k表示为:

$$k = \frac{2}{\lambda_B d(1 - P_e)} \Delta \lambda_B \tag{4}$$

多元光纤柔性触觉传感器网络布局测量空间曲率原理如图 2 所示。设检测方向 a 的曲率大小为 k_a , 方向 b 与 c 上曲率为 k_b 、 k_c 。建立右手坐标系, 规定 a 方向为 y 轴正方向。



图 2 空间曲率测量原理 Fig. 2 Principle of space curvature measurement 则 x 轴方向上的曲率 k_x 为:

$$k_{x} = \frac{\sqrt{3} \left(k_{c} - k_{b}\right)}{2}$$
(5)

y轴方向上的曲率 k_y 为:

$$k_y = k_a - \frac{k_b + k_c}{2} \tag{6}$$

当触角接触到物体时,FBG 中心波长的漂移量 可以明确获知,接下来将研究分析如何通过实验获 知的中心波长漂移量 Δλ 获取接触点的坐标,进而 获取被测物体的空间信息,达到触角对被测物体信 息探知的目的。

近似地将所封装的触觉传感器看作一条线段以 便于构建数学模型并进行分析。如图 3 所示为柔性 触角弯曲状态下的微元,设两个端点为 $L_1 \ L_2$,两 点间的距离是已知的, L_1L_2 为无弯曲状态,当发生 弯曲后 L_2 运动 L'_2 点, 弧 $L_1L'_2$ 的圆心角 $\theta = \widehat{L_1L'_2} \cdot k$,则 L'_2 点的坐标由 L_2 点坐标旋转后得到,数学关 系如下:

$$\begin{bmatrix} B'_{Y} \\ B'_{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{Y} \\ B_{Z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\phi_{1} & -\sin\phi_{1} \\ \sin\phi_{1} & \cos\phi_{1} \end{bmatrix}$$
(7)

此时,坐标系变为 y'z',在 y'z'坐标系下同样利 用旋转坐标的方法得到 L_3 点坐标,这时的旋转角为 ϕ_2 ,值得注意的是这些坐标都是坐标系旋转后的坐 标系下的坐标,要得到原始坐标系下点的坐标,需要 将坐标旋转 – ϕ_1 , – ϕ_2 ,…,再减去平移向量 $\overrightarrow{L_1L'_2}$, $\overrightarrow{L'_2L_3}$,…,以此类推得到曲线上所有点的坐标。 3.2 三维重构的实现

基于多元光纤光栅的柔性仿生触角三维重构是 基于 MATLAB 与 LabVIEW 的联调实现的,可达到





4 实验系统

移量同样可明确得到。

由于笛卡尔机器人可以进行广泛而精确的运 动,因而被用作本实验的三维位移平台。触觉传感 器因接触物体而产生的弯曲上传到 PC 机上,并可 实时处理,进一步确认机器人的后续运动。机器人 (雅马哈 YK600XG)的运动范围为 300 mm × 300 mm × 200 mm, 且 X - Y 方向的最高移动速度为 840 mm/s, Z 方向的最大移动速度为 230 mm/s, 机 器人的重复定位精度为±0.01 mm,它可以承受的 最大载荷为10 kg。触觉传感器固定于机器人的机 械臂末端,大角度的弯折可能导致传感器的损坏,所 以要求我们尽可能仔细地控制接触。在触角的移动 过程中存在如触角振荡等情况,会对测量产生一定 的影响。从 PC 端通过 RS232 电缆和 RCX240 适用 控制器下传操作指令,完成路径积分,并带动马达, 实现机械臂的移动。机器人的编程语言是类似 BASIC 语言的简单编程语言,可简易地记述复杂的 机器人动作。

实验平台的基础搭建基于通过 PC 端控制机器 人机械臂的位置准确移动,在机械臂末端固定多元 柔性触角传感器且与解调仪相连,触觉传感器形变 而导致的中心波长漂移量可在另一 PC 端直观获 知,并可实时得知触角的弯曲程度。实验平台基础 搭建如图 4 所示。



图 4 光纤传感实验系统 Fig. 4 Optical fiber sensing experiment system

- 5 实验分析
- 5.1 曲率标定

触觉传感器封装完成之后,由于传感器弯曲曲 率 k 与其中心波长漂移量 $\Delta \lambda_B$ 成正比,因此要对触 觉传感器的曲率系数 K 值进行标定。曲率标定板 选用铝合金为基材,铝板上铣了不同曲率半径的标 准圆弧型凹槽,标定板的直径为 2.5 mm,可用于放 置传感器。标定时将触觉传感器固定于标定板不同 曲率半径的凹槽内,用于研究光纤光栅在不同曲率 下的中心波长变化情况。实验选取直线以及曲率半 径分别为 1000 mm,400 mm,330 mm,240 mm 的五 种不同圆弧进行实验分析。

光纤光栅的 Bragg 波长是随光栅的周期和纤芯 模的有效折射率变化的,因此 Bragg 波长对于外界 力、热负荷等极为敏感。应变影响 Bragg 波长是由于 光栅周期的伸缩以及弹光效应引起的。当外界的应 力等参量发生变化时,Bragg 波长的变化可表示为: $\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{eff}\Lambda + 2n_{eff}\Delta\Lambda$,其中 Λ 是光栅周期, n_{eff} 是 纤芯等效折射率。由于 FBG 弯曲时所处的位置不 同,故其受到拉伸或者压缩的作用也不同,实验中,光 纤 a 受到压缩作用,光纤 a 的光栅周期变短,则光纤 a 的中心波长应向波长减小的方向漂移。光纤 b、c 受 到拉伸的作用,光纤 b、c 的光栅周期变长,则其的中 心波长应向波长增大的方向漂移。本实验中各光纤 光栅的中心波长的漂移情况如图 5 所示。

三根不同光纤的中心波长漂移量与曲率之间的 线性关系如图 6 所示。拟合曲线的斜率即为触觉传 感器的曲率系数 K 值,其中光纤 a 的曲率系数 K_a 为 0.96839,光纤 b 的曲率系数 K_b 为 0.61785,光纤 c 的曲率系数 K_c 为 0.51567。进行信息识别的实验 时,仿生柔性触角接触物体,由相应的中心波长漂移 量可获知具体的曲率变化及位置坐标信息,随着触 角的持续运动可以获知整个物体的轮廓,达到物体 形状感知的目的。





表 1	不同弯曲程度下的曲率匹配相对误差

Tab. 1 The curvature of different bending degree matches the relative error

曲率	光纤 a	光纤 b	光纤 c
1.0000	0.01173	0.00160	0. 01442
2.5000	0.01088	0.00241	0.00140
3.0300	0.00034	0.00126	0. 04784
4. 1600	0.00001	0.01755	0.00013

在不同弯曲程度下的曲率匹配相对误差如表 1 所示。由于传感器封装的影响,对三根 FBG 进 行了一定的拉伸应力补偿,其中光纤 a 的补偿系数 为1.247,光纤 b 的补偿系数为1.992,光纤 c 的补 偿系数为2.398。实验结果表明,该柔性仿生触角 传感器能够在不同的弯曲程度下很好的匹配相应 的曲率,为被测物体的信息识别提供了可靠的 保障。

5.2 轮廓识别

柔性仿生触角在接触物体时会产生一定挠度的 弯曲,通过中心波长漂移量可以获取相应接触点的 位置坐标。选取圆柱作为被测物体,柔性仿生触角 绕着圆柱稳定地走过一段圆弧,将所获得的被测物 体的坐标点进行拟合,并将拟合所得的物体轮廓图 与实物理论图进行对比。

使用 MATLAB 对坐标点进行拟合,拟合结果 如图 7 所示。拟合曲线的参数如表 2 所示。从 表 2 中可以看出,拟合曲线和实际曲线之间的参 数偏差很小,从而证明柔性仿生触角实现形状感 知是可行的,为实现更复杂形状物体的感知提供 了基础。



图 7 物体轮廓识别图 Fig. 7 Object contour map

表 2	圆形截面拟合曲线参数	r
1X 4	四川低山叭口四以今め	L .

Tab. 2 Parameters of the circular section fitting curve

	圆心坐标/mm	半径/mm
理论值	(0,0)	25.00
实验值	(-1.22, -0.43)	25.38
误差	偏移量≤1.22	1.52%



图 8 被测物体 Fig. 8 Test object

6 结 语

本文提出了一种可应用于智能机器人上的柔 性仿生触角,实验系统具有显示触角弯曲程度且 可进行物体形状感知的功能。通过实验标定,获 得了光纤光栅中心波长漂移量与曲率之间的线性 关系。实验结果显示该基于多元光纤光栅的柔性 仿生触角具有很好的曲率匹配率,相对误差在 0.00001~0.004784之间,满足进行物体信息识别 的要求,且通过实验获知的触觉传感器的曲率系 数K值可以很好获取物体的坐标信息等。实验研 究表明,该仿生柔性触角能够实现形状感知。本 文所提出的测量方法,即通过对中心波长漂移量 的获知便可进而得知所接触物体的位置信息,大 大简化了传感器的机构,同时也提高了物体信息 识别的准确程度。该方法在智能机器人形状感知 方面具有应用前景。

参考文献:

- [1] GUO Yongxing, KONG Jianyi, XIONG Hegen, et al. Advances in robot force/torque tactile sensing technology based on fiber bragg grating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5):61 72. (in Chinese).
 郭永兴,孔建益,熊禾根,等. 基于光纤 Bragg 光栅的机器人力/力矩触觉传感技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5):61 72.
- [2] WANG Lichao. Recognition of object's softness and hardness based on tactile information of robotic hand [D].

Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese) 汪礼超. 基于机械手触觉信息的物体软硬属性识别 [D]. 杭州:浙江大学, 2016.

- [3] ZHENG Hanqing. Research on the application of the object recognition based on whisker sensor array[D]. Nanjing:NUAA,2016. (in Chinese)
 郑汉卿.基于触须传感器阵列的物体识别应用研究
 [D].南京:南京航空航天大学,2016.
- [4] XIE Qinghua, GU An, DAN Chunhua. The Robotic whisker sensor system based on PSD[J]. Mechatronics, 2007. (in Chinese)
 谢清华,谷安,但春华. 基于 PSD 的机器人触须传感器系统[J]. 机电一体化,2007,14(2):64-67.
- [5] WU Zhongtai, ZHANG Yanan, SHEN Linyong, et al. The research of FBG shape sensor[J]. Metrology & Measurement Technique, 2017, 44(5):56-58. (in Chinese) 吴仲台,章亚男,沈林勇,等. 光纤光栅形状传感器的研究[J]. 计量与测试技术, 2017, 44(5):56-58.
- [6] Zhao C, Jiang Q, Li Y. A novel biomimetic whisker technology based on fiber Bragg grating and its application
 [J]. Measurement Science & Technology, 2017, 28
 (9):095104.
- [7] LOU Xiaoping, CHEN Zhongqing, ZHUANG Wei, et al. Error analysis and calibration for FBG shape reconstruction based on non-orthogonal curvatures [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2): 386 - 393. (in Chinese)

娄小平,陈仲卿,庄炜,等. 非正交 FBG 柔杆空间形状 重构误差分析及标定[J]. 仪器仪表学报,2017,38 (2):386-393.

- [8] ZHANG Xuezhi, ZHU Lianqing, ZHANG Yinming, et al. Fiber bragg grating with nonmetal and corrosion resisting packaging and its temperature characteristic [J]. Laser & Infrared, 2015, 45(4):437-441. (in Chinese) 张学智, 祝连庆, 张荫民,等. 光纤光栅非金属耐腐蚀 封装及其温度特性研究[J]. 激光与红外, 2015, 45 (4):437-441.
- [9] Evans M H, Fox C W, Lepora N F, et al. The effect of whisker movement on radial distance estimation: a case study in comparativerobotics [J]. Frontiers in Neurorobotics, 2012, 6:12.
- [10] Huang Y, Jiang Q, Li Y, et al. Research and design of a novel, low-cost and flexible tactile sensor array[J]. Measurement, 2016, 94:780-786.

- [11] Fujiwara E, Wu Y T, Schenkel E A, et al. Development of a tactile sensor based on optical fiber specklegram analysis and sensor data fusion technique[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2017, 263:677-686.
- [12] Yi Z, Zhang Y, Peters J. Bioinspired Tactile Sensor for Surface Roughness Discrimination [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2017, 255:46 - 53.
- [13] Yang T, Xie D, Li Z, et al. Recent advances in wearable tactile sensors: Materials, sensing mechanisms, and device performance [J]. Materials Science & Engineering R Reports, 2017, 115:1-37.
- [14] CHEN Hao, YAN Guang, ZHUANG Wei, et al. Research on preload package and sensing characteristics of fiber Bragg grating strain sensor[J]. Laser & Infrared, 2016, 46 (9):1128 - 1132. (in Chinese)
 陈昊, 闫光, 庄炜, 等. 光纤光栅应变传感器预紧封装 及传感特性研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(9): 1128 - 1132.
- [15] Yoo J Y, Seo M H, Lee J S, et al. High performance flexible tactile sensor array using a large area plastic nanograting substrate [C]// International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. 2017: 508-511.
- [16] Wang Y, Liang G, Mei D, et al. Flexible Tactile Sensor Array Mounted on the Curved Surface: Analytical Modeling and Experimental Validation [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2017, (99):1-10.
- [17] Dürr V, Krause A F, Neitzel M, et al. Bionic Tactile Sensor for Near-Range Search, Localisation and Material Classification [C]// Autonome Mobile Systeme, 20 Fachgespräch, Kaiserslautern, 18/19 Oktober. DBLP, 2007:240-246.
- [18] Xiaohui H U, Zhang X, Liu M, et al. A flexible capacitive tactile sensor array with micro structure for robotic application [J]. Science China Information Sciences, 2014, 57 (12):1-6.
- [19] Jiang Q, Xiang L. Design and experimental research on small-structures of tactile sensor array unit based on fiber bragg grating [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17 (7): 2048 – 2054.
- [20] Zhang J, Xia G, Xie Y, et al. A New Method for the Analysis of Cascaded Fiber Bragg Gratings Applied to Tactile Sensors[C]// International Conference on Robots & Intelligent System. IEEE, 2016:30 - 33.