

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311419

基于信号特征分析和多小波变换的 机械手滑动觉感知研究^{*}

孙世政, 秦鸿宇, 何盛港, 陈仁祥

(重庆交通大学机电与车辆工程学院 重庆 400074)

摘要:针对机械手抓取目标过程中滑移特征信号辨识困难问题,提出了多小波变换滑动觉特征检测方法。首先,研究基于FBG传感的柔性触滑觉感知机理,设计非对称梁式双层“十字”型分布传感单元结构,分析了搭载该触滑觉传感器的机械手多阶段动态抓握信号特征;其次,构建触滑觉感知实验平台,开展了动态抓握过程的触滑觉感知实验;然后,基于db10小波降噪方法对滑动觉感知信号降噪处理;最后,提出Mexican hat连续小波和一阶Haar离散小波的滑动觉信号特征分离和感知方法,并进行了相关实验研究。实验结果表明,在小波细节系数检测阈值 $\pm 2 \times 10^{-4}$ 作用下,不同抓握力的滑动检测平均准确率可达98.88%,可以精确识别被机械手抓取目标的滑移状态。

关键词: 滑动觉; 光纤布拉格光栅; 小波变换; 机械手; 触觉

中图分类号: TH741 TN247 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

Research on sliding perception of manipulators based on signal feature analysis and multi wavelet transform

Sun Shizheng, Qin Hongyu, He Shenggang, Chen Renxiang

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

Abstract: A multi wavelet transform sliding feature detection method is proposed to address the difficulty in identifying sliding feature signals during the process of robotic arm grasping targets. Firstly, the mechanism of flexible tactile slip sensing based on FBG sensing is studied, and a double-layer “cross” type distributed sensing unit based on FBG is designed. Secondly, a tactile perception experimental platform is established and tactile perception experiments are implemented on the dynamic grasping process. Then, based on the db10 wavelet denoising method, the sliding perception signal is denoised. Finally, a sliding signal feature separation and perception method using the Mexican hat continuous wavelet and the first-order Haar discrete wavelet is proposed, and relevant experimental research is conducted. The experimental results show that the detection threshold of wavelet detail coefficients is $\pm 2 \times 10^{-4}$, and the average accuracy of sliding detection with different grip forces can reach 98.88%, which can accurately identify the sliding state of the target being grasped by the robotic arm.

Keywords: sliding sensing; fiber Bragg grating; wavelet transform; manipulator; tactile sensing

0 引言

触滑觉传感器作为仿生机械手信息感知重要部件,在工业机器人、医疗机器人及精密操作微驱动器机器人等领域均占有重要地位,其性能指标体现了机器人

的智能化水平^[1]。目前国内外对滑动觉传感器的研究正朝着集成化、智能化和微型化的方向发展。常见的滑动觉传感器按工作原理可分为压阻式^[2]、压电式^[3]、电容式^[4]、和光电式^[5]等形式,其中基于电学的滑动觉传感器虽具有良好的测量精度和空间分辨率等优点,但大多数不能兼具柔韧性和灵活性,且存在抗电磁干

收稿日期:2023-05-11 Received Date: 2023-05-11

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(52105542)、“成渝地区双城经济圈建设”科技创新(KJCX2020032)、重庆市教育委员会科学技术研究(KJZD-K202200705)项目资助

扰能力较差、动态响应能力不足、复合感知能力较弱等问题,具有一定局限性,难以实现机械手高精度作业时动态滑动觉信息检测。

相较于传统的电类传感器,光纤布拉格光栅(fiber bragg grating, FBG)凭借其体积小、可柔性化、响应速度快和抗电磁干扰等优点,已成为近几年国内外研究的新热点,被广泛应用于航空航天、电力工业、军工工业、生物化工、医疗卫生等行业^[6-7],其中滑动觉动态复合感知领域也取得了一定的进展。钱牧云等^[8]提出一种基于 FBG 二维分布式传感阵列的触滑觉检测方法,利用聚合物封装的特殊二维空间分布结构,实现了触滑觉复合感知,但其维间耦合干扰较大。在此基础上 Sun 等^[9]提出一种硅胶体封装的双层“双十字”空间分布式触滑觉复合感知单元,利用聚合物的延展性和“双十字”结构的延迟性,实现了硅胶体表面物体滑动方向和滑动速率检测,但传感器体积较大,难以应用于机械手指指尖抓握研究。刘春辉等^[10]提出一种硅胶体封装的“米”型 FBG 组网结构,通过状态解耦模型实现封装体表面目标物体运动状态检测,但该结构布线复杂,且微小滑动检测能力有限。以上研究皆能实现触滑觉复合感知检测,但其大多数多维空间分布式结构存在较大维间耦合干扰现象,且上述滑动觉感知皆以大面积封装体上“点-点”间滑动监测为主要研究对象,难以应用于机械手指指尖“面-面”接触式抓握状态下滑动觉信号监测。

在滑动信号检测方面,移动平均等常见的时序分析方法难以实现在线实时监测,而机器学习方法、信号处理技术等方法可满足机械手动态抓取中低延迟性等要求,因此国内外学者将此类方法用于滑动觉检测研究。Massari 等^[11]利用卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)算法实现手臂表面皮肤力触觉感知和滑动信号检测,但神经网络的参数设置和结构选取具有随机性。Yi 等^[12]采用遗传算法优化的极限学习机进行滑动觉信号监测,实现了机械手动态抓握目标物体,但该算法易陷入局部最优解。Feng 等^[13]提出了一种基于滑动觉信号二阶导的新型信号处理方法,实现了单向滑动觉信号检测,但受噪声干扰较严重。上述检测方法能实现在线实时监测功能,但未兼顾检测精度和效率,且机器学习算法参数选取困难、信号处理技术泛化性较差等问题亟需作进一步地优化及改进。

因此,针对基于光纤光栅的机械手“面-面”接触式指尖滑动觉感知这一研究空缺,本文以柔性体作 FBG 封装基体的非对称梁式双层“十字”触滑觉传感器为研究对象,开展基于触滑觉信号特征分析的机械手滑动觉感知研究,提出了 Mexican hat 连续小波和一阶 Haar 离散小波的滑动觉信号特征分离和感知方法。

1 理论分析

1.1 FBG 触觉传感机理

FBG 是一种波长调制型光无源器件,通过光栅中心波长漂移量来映射外界待测参数的变化^[14]。如图 1 所示,当入射宽带光在光纤中透射时,根据光纤耦合模理论,满足布拉格栅区条件的光则会被反射,形成反射光,其表达式如下:

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

式中: λ_B 为光纤布拉格光栅反射中心波长, n_{eff} 为有效折射率, Λ 为光栅周期。

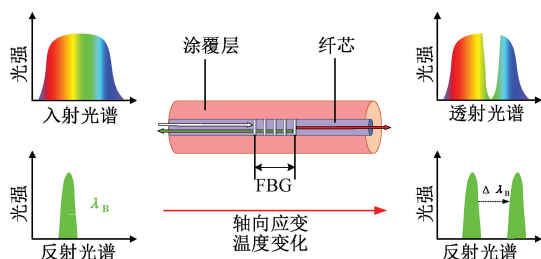


图 1 光纤布拉格光栅传感原理

Fig. 1 Fiber bragg grating sensing principle

在外界物理量中,温度 T 、轴向应变 ε_z 等因素的变化会引起 FBG 中心波长产生漂移,以上 3 个因素对中心波长漂移的影响可表示为^[15]:

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e)\varepsilon_z\lambda_B + (\alpha + \xi)\Delta T\lambda_B \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为光纤光栅中心波长漂移量, 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弹光系数 $P_e = 0.22$), α 为光纤材料的膨胀系数, ξ 为光纤材料的热光系数。

1.2 触滑觉感知机理

将 FBG 埋埋于柔性聚合物中,如图 2 所示,该传感器可分为柔性聚合物、粘接剂层和 FBG 层。

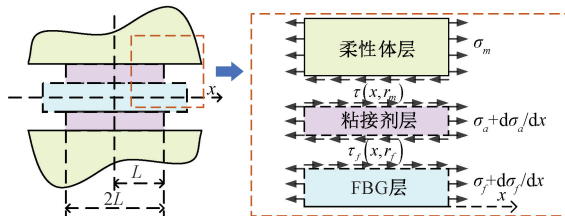


图 2 柔性封装示意图

Fig. 2 Diagram of flexible packaging

搭载该柔性触滑觉传感器的机械手抓握物体过程中,柔性体在接触力作用下产生轴向应变,由剪滞理论知,粘贴层和基体的弹性模量不一致则会产生剪应力,基

体产生的轴向应变通过剪切应力会传递给粘贴层,粘贴层会通过剪切力将应变传递给光纤光栅层,使得光纤光栅也产生轴向应变,轴向应变传递规律如图2所示,其中平均应变传递效率可表示为^[16]:

$$\bar{\alpha} = 1 - \frac{\sinh(kL)}{kL \cosh(kL)} \quad (3)$$

其中,

$$k^2 = \frac{2G_a}{r_f^2 E_f \ln\left(\frac{r_m}{r_f}\right)} \quad (4)$$

式中: $2L$ 为光纤光栅栅区长度; G_a 为柔性基体剪切模量; r_f 、 r_m 为光纤光栅层和粘胶剂层半径; E_f 为光纤光栅弹性模量。

当机械手抓握物体提升至悬空状态时,该柔性传感器与被抓物体间将会产生静摩擦,而此时被抓物体与传感器之间保持相对静止,其受力情况如图3所示。图中 F 为被抓物体所受的压力, F_f 为被抓物体的由正向压力产生的摩擦力, G 为物体所受的重力,当抓握压力所产生的摩擦力 F_f 等于物体重力 G 时,即 $G=F_f$ 时,被抓握物体所受的重力表征FBG所受的剪切力 f_x 。

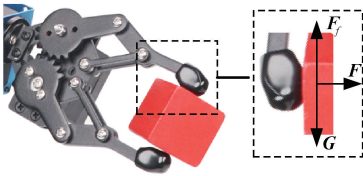


图3 机械手抓握目标力分析

Fig.3 Analysis of gripping target force of manipulator

如图4所示,在柔性聚合物封装下所产生剪切力 τ 和剪切应变 γ 为:

$$\tau = \frac{f_x}{bl} \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{2f_x(1+v)}{blE} \quad (6)$$

式中: f_x 为平行于封装体表面的正向摩擦力, v 为柔性体泊松比, b 和 l 为柔性体长宽尺寸, E 为封装体杨氏模量。

由于实际上摩擦力引起的封装体形变远远小于封装体本身尺寸,所以角度 r 非常小,即 $\theta \approx \alpha$;故封装体剪切应变可以表示为:

$$\gamma \approx \tan r = \frac{\Delta l}{h} \quad (7)$$

将式(6)带入式(5)可得由正向摩擦力所引起的轴向应变 ε_z 为:

$$\Delta l = \frac{2hf_x(1+v)}{blE} = \frac{f_x}{k} \quad (8)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta l \cos \theta}{\sqrt{b^2 + l^2}} = \frac{f_x \cos \theta}{k_m \sqrt{b^2 + l^2}} \quad (9)$$

其中,

$$k_m = \frac{blE}{2h(1+v)} \quad (10)$$

将式(9)代入式(2)可得FBG在柔性封装体下摩擦力敏感系数:

$$k = \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B \varepsilon_z} = (1 - P_e) \frac{\cos \theta}{k_m \sqrt{b^2 + l^2}} \quad (11)$$

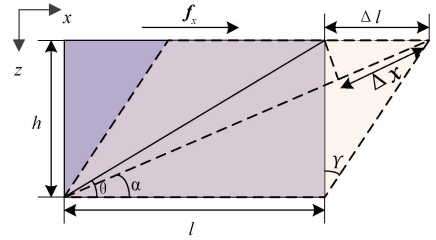


图4 柔性封装下摩擦力模型

Fig.4 Friction model under flexible package

机械手抓握过程中,抓握压力所产生的摩擦力 F_f 小于物体重力 G 时,即 $G > F_f$ 时,物体在被抓握并移动过程中将会产生滑动。滑动信号是机械手和被抓握目标之间产生的另一种力触觉信号,机械手指和物体因摩擦而产生轻微振动,摩擦振动本质为机械手指尖传感器与被抓握目标之间表现为“接触-分离-接触”的往复接触形式,相较于稳定抓握阶段,滑动阶段输出信号表现为波动的力触觉感知信号。通过摩擦振动信号特征分析,利用时域与频域相结合的方式对波动信号特征提取,可实现对滑动信号的精确感知。

1.3 动态抓握仿真分析

以FBG传感原理和柔性触滑觉感知机理为基础,构建非对称梁式双层“十字”型触滑觉复合感知单元,选取硅胶材料作为封装基体,弹性模量为0.0078 GPa,泊松比为0.49,热膨胀系数为 $1.033 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,填埋于封装材料中的两根光纤布拉格光栅FBG1、FBG2的中心波长分别为1542.006和1532.097 nm,光栅栅区长度均为10 mm;机械手和柔性传感器之间采用聚氨酯胶粘剂进行连接,如图5所示。

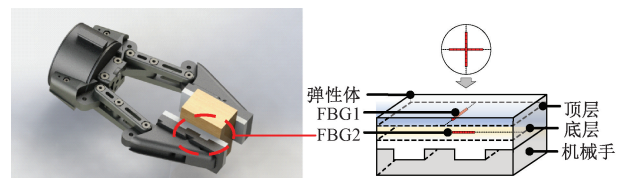


图5 传感单元结构体

Fig.5 Sensing unit structure body

搭载柔性 FBG 触滑觉传感器的机械手动态抓握目标过程可分为 3 种状态:1)初始抓握状态:该状态下机械手抓握放置于平台上的目标,在初始抓握力作用下,柔性封装体仅受径向压力作用而产生变形;2)稳定抓握状态:该状态下机械手将被抓握目标抓握至悬空状态且未产生滑动,柔性封装体在受径向压力作用变形下,还存在克服被抓握目标重力作用而产生的摩擦作用,封装体在垂直向下的剪切力作用下产生纵向变形;3)滑动抓握状态:该状态下机械手与被抓握目标之间产生滑动,在第 2 阶段基础上封装体与被抓握目标之间产生持续性摩擦振动。

为了探究机械手抓握过程不同状态与 FBG 波长漂移信号之间的映射关系,利用有限元仿真软件对机械手动态抓握过程进行有限元仿真分析。设置封装体杨氏弹性模量 0.007 5 GPa,泊松比 0.49,密度 1 080 kg/m⁻³;其他部件均设置为结构钢材料,且定义为刚体。在标准重力场下,在被抓握目标上表面设置不同外加载荷模拟被机械手抓握的 3 种不同状态,最终得应力分布云图,如图 6 所示,通过应力与中心波长漂移量之间的映射关系^[17],可得不同抓握状态 FBG1 中心波长漂移情况如图 7 所示。

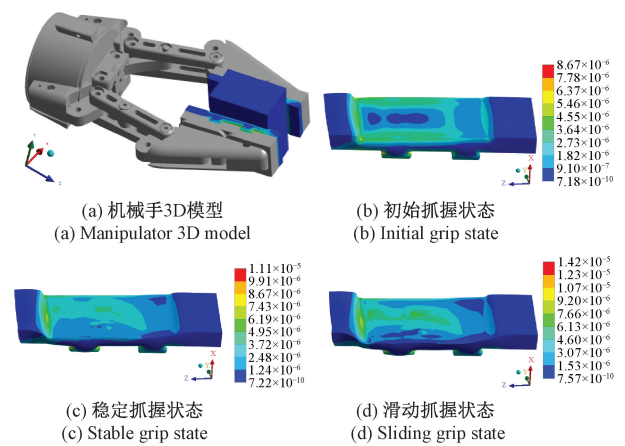


图 6 不同抓握状态应力分布

Fig. 6 Stress distribution in different grasping states

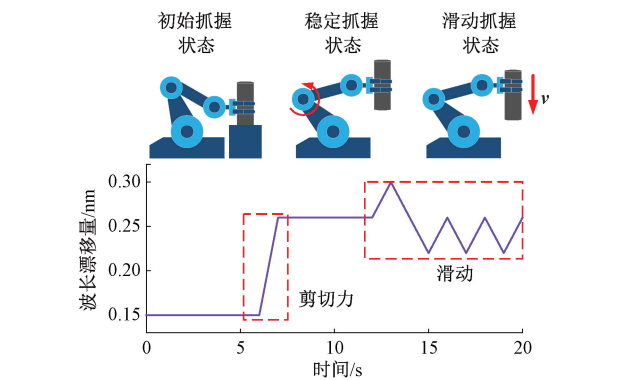


图 7 不同抓握状态下波长漂移信号

Fig. 7 Wavelength drift signal under different grip states

2 动态抓握状态下触滑觉感知实验与分析

2.1 触滑觉感知实验平台

构建机械手抓握控制系统,搭建触滑觉感知实验平台,如图 8 所示。其中实验平台主要包括 HYPERION 公司的 FBG 波长解调仪,型号为: Si155 (波长精度为 1 pm),触滑觉标定平台,标准砝码若干,上位机数据采集系统,智能灵巧机械手。

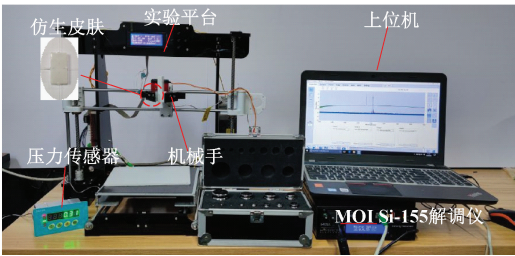


图 8 触滑觉感知实验平台

Fig. 8 Experimental platform for tactile perception

2.2 触滑觉感知实验与分析

由于初始抓握状态为静态抓握,因此针对机械手初始抓握状态开展指尖触滑觉传感器静态压力传感器特性研究。调节机械手抓握力,步长为 0.25 N,范围为 0~3 N,记录每步正向压力值以及对应的中心波长漂移值,重复 3 次实验,如图 9 所示。3 次实验中的压力灵敏系数分别为 69.4、69.3 和 69.3 pm/N,平均压力灵敏系数 k_{p2} 为 69.3 pm/N。FBG1 由于受非对称梁式结构的影响,0~1.2 N 段波长漂移不明显,1.2~3 N 段随正向压力值的增加,中心波长漂移量相较 FBG2 漂移量变化减小,选取 1.2~3 N 段作对照分析研究,其中 3 次实验的压力灵敏系数分别为 58.5、61.2 和 60.4 pm/N,平均灵敏系数 k_{p1} 为 60.1 pm/N。

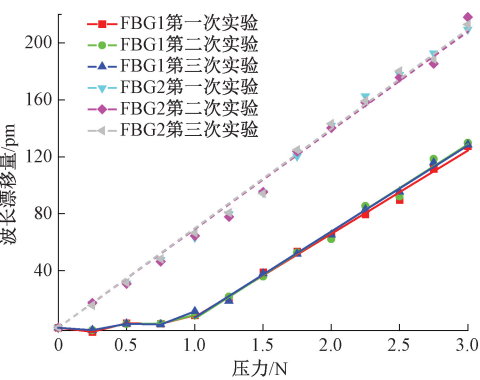


图 9 压力响应曲线

Fig. 9 Pressure response curve

机械手稳定抓握阶段表现为初始抓握状态的剪切力突变,因此针对机械手稳定抓握状态开展指尖传感器剪切力感知特性研究。设置机械手抓握力 3 N 抓握目标,改变外加载荷大小范围为 0~4 N,施加步长为 0.5 N,设置上位机记录数据的采样频率 1 000 Hz,记录每步正向压力值以及对应的中心波长漂移值,重复 3 次实验,如图 10 所示。FBG1 的剪切力灵敏度分别是-14.9、-13.1 和 -14.9 pm/N,平均灵敏度 k_{s1} 为-14.3 pm/N;FBG2 的剪切力灵敏度为 10.0、9.3 和 9.6 pm/N,平均灵敏度 k_{s2} 为 9.6 pm/N。

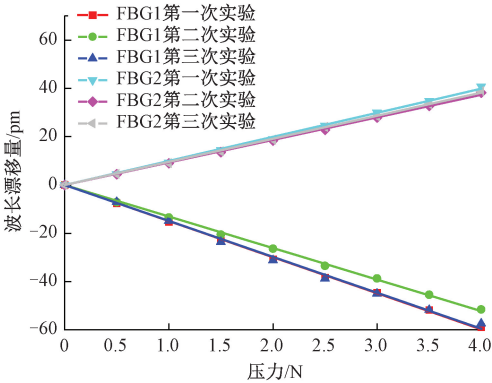


图 10 剪切力拟合曲线
Fig. 10 Shear force fitting curve

针对机械手滑动抓握状态开展滑动觉感知实验研究,利用机械手指尖静态力触觉感知能力调节机械手初始抓握力,使得机械手抓握力控制在 1~4 N,步长为 1 N。使用机械手将被抓握目标提升至悬空状态,通过砝码设置低速滑动,使其达到滑动抓握状态,最后再卸载至初始抓握状态。上位机数据采集模采样频率设置 1 000 Hz,如图 11 所示。

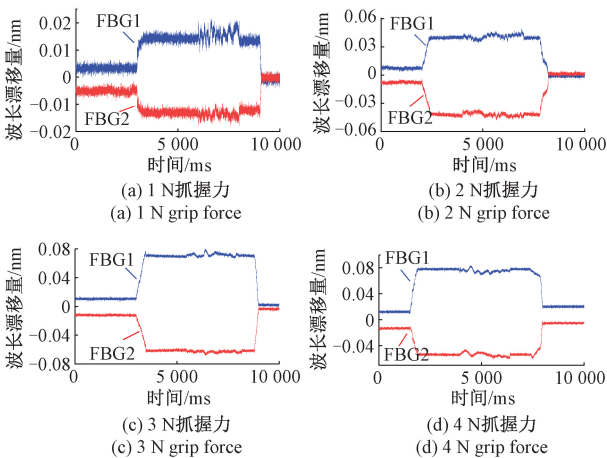


图 11 不同抓握状态下原始滑动信号
Fig. 11 Raw sliding signal in different grip states

初始抓握状态和稳定抓握状态表现为较为稳定的波长漂移信号,初始抓握状态至稳定抓握状态存在明显的剪切力信号突变,稳定抓握状态至滑动抓握状态表现为摩擦振动而引起的强烈波动信号。力触感知信号影响较小时被抓握目标和硅橡胶机械手之间会由摩擦振动而呈现出接触力交替减小的现象,中心波长漂移量呈现剧烈的波动。随着机械手抓握力增大,力触感知信号对信号的影响程度逐步增大,由被抓握目标滑动而产生的摩擦振动对信号的影响亦随之减小,接触力交替变化的频率变小,滑动觉信号逐步变得平稳。

3 滑动觉感知研究

3.1 滑动感知信号降噪分析

由于原始信号中含较强环境噪音,不利于滑动觉感知信号分析处理,因此首先利用小波变换对信号进行降噪处理,本文分别选取 3 种不同小波基进行滑动觉信号进行降噪处理。利用信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)、每组加载实验数据的均方根误差(root mean squared error, RMSE)和波形相似性系数(normalized correlation coefficient, NCC)对以上 3 种不同小波基降噪处理效果作评估对比分析。

截取 1 N 抓握力滑动状态下波动较剧烈的一段进行降噪处理研究。选取 Haar 小波进行 6 层和 5 层分解重构,db10 小波、sym6 小波进行 7 层和 8 层小波分解和重构,如图 12 所示。对分解重构后的信号进行信噪比(SNR)、均方根误差(RMSE)和波形相似系数(NCC)计算,最终结果如表 1 所示。从表中可以看出,sym6 小波 7 层分解下的信噪比 SNR 值最大,其次是 db10 小波 7 层分解;对比 2 种小波下的均方根误差 RMSE 值和波形相关系数 NCC 值,db10 小波的 RMSE 值更小、NCC 值更趋近于 1。综合分析 3 种小波的各项评价指标,最终选取 db10 小波 7 层分解重构方法对 4 次滑动觉感知实验信号进行降噪处理。

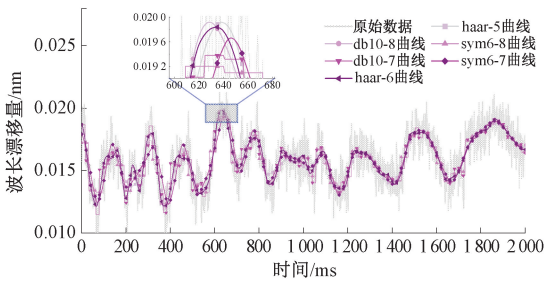


图 12 不同小波基降噪曲线
Fig. 12 Noise reduction curves with different wavelet bases

表 1 不同小波基降噪效果对比

Table 1 Comparison of noise reduction effects of different wavelet bases

小波类型	SNR/dB	RMSE	NCC
db10-8	23.580	0.001 1	0.997 8
db10-7	24.015	0.001 0	0.998 2
Haar-6	23.017	0.001 2	0.997 2
Haar-5	23.750	0.001 1	0.997 7
sym6-8	23.551	0.001 1	0.997 5
sym6-7	24.028	0.001 5	0.997 9

3.2 基于 CWT 的滑动觉感知

在滑觉信号研究过程中,需从非平稳信号中有效提取出特征值,从而提高滑动信号特征检测准确率。本文通过连续小波(continuous wavelet transform, CWT)在时频域上对滑动觉信号进行分析处理,使用不同尺度下的小波分量,分析其频率的变化以及其时间特性。为了兼顾初始滑动检测实现的难易程度和滑动抓取力控制的实时性,利用 CWT 将滑动信号转化为二维图像信息。由于 Mexican hat(Mexh)小波与所采集滑动觉感知信号所表现出的波长漂移形状相似,因此本文选取 Mexh 小波进行连续小波变换。其中连续小波变换可表示为^[18]:

$$W_{\psi}(a,b)=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{+\infty}x(t)\bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right)dt\tag{12}$$

式中: $W_{\psi}(a,b)$ 表示连续小波函数系数; a 和 b 分别代表小波变换中的尺度因子和平移因子; $x(t)$ 为初始滑觉信号; $\psi(t)$ 为小波基函数; $\bar{\psi}(t)$ 为小波基函数的共轭复数。

选取滑动抓握状态下波长漂移量波动剧烈的 1 N 抓握力和波动平缓的 4 N 抓握力下的滑动实验数据作时频域对比分析研究。对在 db10 小波 7 层分解重构后的信号使用 Mexican hat 小波进行连续小波变换,得到 1 和 4 N 抓握力下滑动觉信号的时频分析图,如图 13 所示。在抓握过程中,时频图反映出在初始抓握状态和稳定抓握状态表现为低能量低频信号,在加载阶段和卸载阶段出现较为高能量高频信号,在滑动抓握状态由于轻微摩擦振动原因而产生持续性波动,时频图表现为较高能量高频信号。

由于加载卸载阶段所产生的突变信号与滑动抓握状态所产生的波动信号之间存在相互干涉等问题,因此通过设定信号能量阈值,识别能量较大、频率较高的加载卸载信号,将初始抓握状态信号与稳定抓握状态和滑动抓握状态信号进行信号分割,便于滑动觉信号的精确感知。将 4 次实验能量信号进行归一化处理,在能量阈值为 0.72 下进行信号分割,所截取稳定抓握状态和滑动抓握状态信号,如图 14 所示。

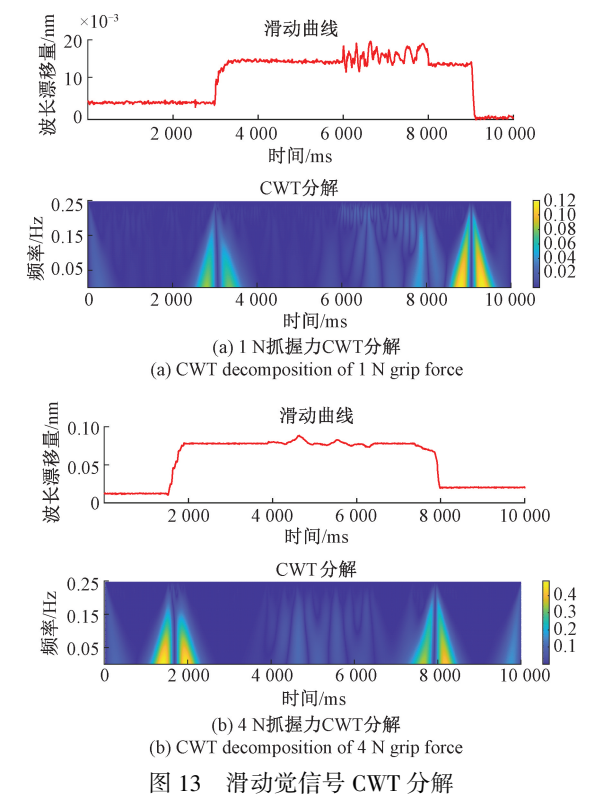


图 13 滑动觉信号 CWT 分解

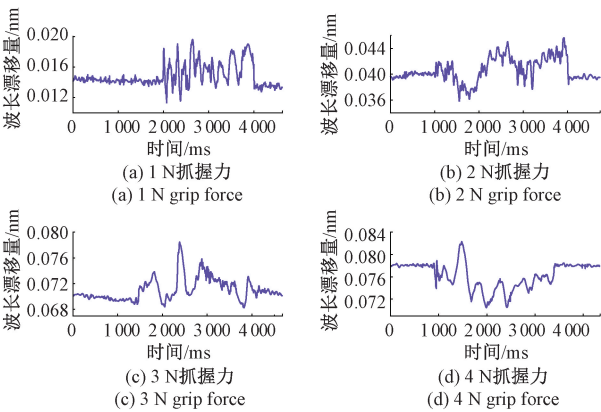


图 14 稳定和滑动抓握状态信号

Fig. 14 Stable state and sliding grip state signals

3.3 基于 DWT 的滑动觉感知

离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)可在不同频段对滑动觉信号进行分析。本文选择响应速度较快且具有良好抗干扰性的 Haar 小波进行信号特征分析。FBG 传感器反馈的抓取力信息 $f(x)$ 经过 Harr 小波分解后,可以表示为 Haar 尺度函数和 Haar 小波函数的线性和,如下:

$$f(x)=\sum_{k\in Z}b_k^{-1}\psi(2^{j-1}x-k)+\sum_{k\in Z}a_k^{-1}\psi(2^{j-1}x-k)\tag{13}$$

式中: b_k^{j-1} 代表滑动信号的细节系数, a_k^{j-1} 代表滑动信号的近似系数, j 为阶数。

由 $a_k = f(k/2^j)$ 可得:

$$b_k^{j-1} = \frac{f(2k/2^j) - f((2k+1)/2^j)}{2} \quad (14)$$

当阶数 $j=1$ 时为一阶离散小波变换。滑动检测算法利用 Haar 小波对滑动抓取过程中 FBG 反馈回的接触力信息进行分解,通过细节系数峰值检测初始滑动过程中所产生突变信号以实现滑动抓握状态实时感知。

1 N 抓握力下机械手稳定抓握阶段和滑动抓握阶段的离散型 Haar 小波分解曲线如图 15 所示,稳定抓握阶段和滑动抓握阶段 5 阶细节系数皆存在波动,稳定抓握状态小波细节系数存在小范围波动,滑动抓握状态产生剧烈波动,小波细节系数表现出明显突变,可在以上基础上进一步设置滑动检测阈值,去除掉稳定抓握状态中部分位置细节系数信号波动干扰,提高滑动抓握状态突变检测的准确度。

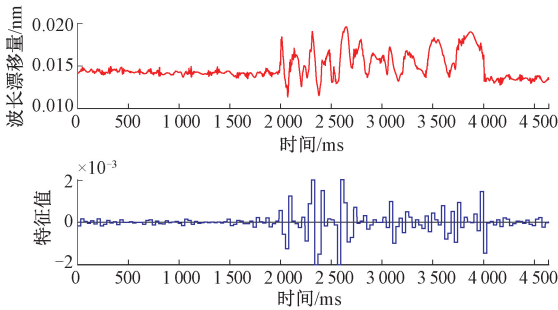


图 15 滑觉信号 DWT 分解

Fig. 15 DWT decomposition of the slip signal

利用寻峰算法对 4 种抓握力实验数据的小波细节系数进行归类总结,得到如图 16 所示 4 次不同抓握状态下的 20 组系数峰值曲线。

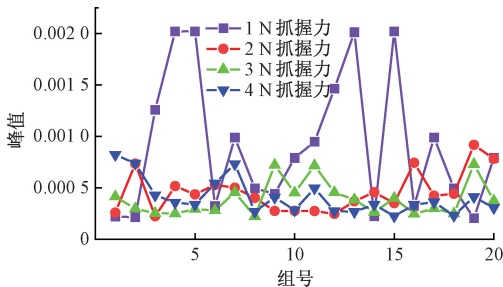


图 16 细节系数峰值曲线

Fig. 16 Peak detail factor curve

通过曲线数据对比分析,设置“硬阈值” $th_1 = \pm 2 \times 10^{-4}$ 过滤稳定抓握状态信号轻微波动所产生的突变信号,如图 17 所示,过滤后的稳定抓握状态小波细节系

数仅在极少数位置存在微小变化,基本排除稳定抓握状态对滑动信号检测的干扰;而滑动抓握状态与过滤前基本无变化。因此,可在此基础上选取合适的小波细节系数检测阈值 th_2 则可检测出滑动抓握状态中的信号波动,可实现滑动觉信号的实时精准感知,进一步可实现机械手动态抓握自主控制。

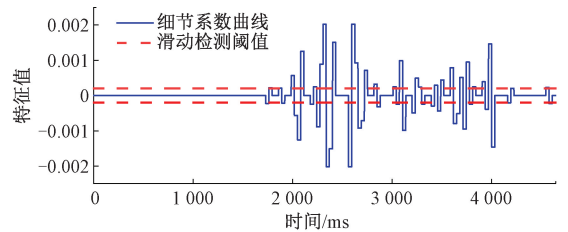


图 17 “硬阈值”过滤后细节系数

Fig. 17 “Hard threshold” filtered detail factor

综合分析 4 组实验数据细节系数稳态最大峰值和滑动状态最大峰值,最终设定细节系数滑觉检测阈值为 $th_2 = \pm 2.2 \times 10^{-4}$,在小波过滤阈值 th_1 和检测阈值 th_2 的双重干预下,4 次实验中稳定抓握状态信号轻微信号波动所引起的干扰基本清除。稳定抓握状态细节系数通过率分别为 0.2%、0.6%、1.3%、0.2%,滑动抓握状态细节系数峰值通过率分别为 99.3%、99.2%、97.6%、99.4%,平均通过率为 98.88%,且在滑动抓握状态初期便能准确识别滑觉信号特征,达到了机械手抓取目标时的精准实时滑动觉检测目的。

3.4 滑动检测对比分析

为验证多小波变换滑动觉信号特征感知方法的检测效果,将它与极限学习机 (extreme learning machines, ELM)、CNN、BP 神经网络 (back prpgagation neural networks, BPNN) 和滑动信号二阶导 (second derivative, SD) 方法作对比分析。其中,ELM、CNN 和 BPNN 参数设置最优,取最佳检测结果作最终对边实验分析,实验结果如图 18 所示。ELM、BPNN 和 CNN 机器学习类滑动信号检测方法平均准确率分别为 98.1%、97.0% 和 97.9%,但随滑动信号波动程度减弱,神经网络类算法滑动特征识别准确率随之下降,4 N 抓握力识别率较前 3 组平均识别率分别下降了 2.7%、3.5%、3.4%。取信号二阶导进行波动信号特征识别检测的平均准确识别率为 96.6%,且易受到环境噪声干扰,波动较为剧烈的 1、2 N 滑动识别信号识别率明显偏弱,仅为 92.6%、96.4%,且识别中产生大量稳态信号误识别现象。

对比分析结果表明,多小波分解下的信号分离与特征识别方法滑动特征信号识别率更高,抗环境干扰能力更强,不同波动状态下的滑动觉信号识别率更稳定,具有更好的滑动觉特征信号识别效果。

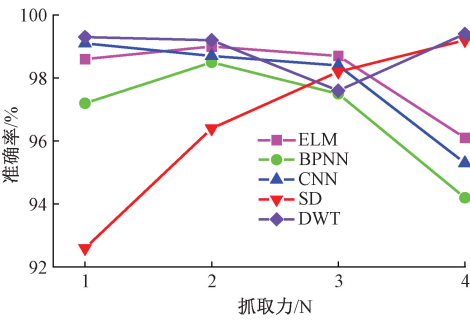


图 18 特征识别对比分析

Fig. 18 Comparison analysis of feature recognition

4 结 论

本文结合 FBG 传感理论和触滑觉感知机理,以基于双层“十字”型 FBG 的柔性触滑觉传感器为研究对象,开展了机械手滑动觉感知研究。通过 Mexican hat 连续小波变换和 Haar 离散小波变换对滑动觉信号进行分离和特征提取,以小波分解细节系数波动峰值作滑觉识别特征,在滑动觉过滤阈值和检测阈值作用下,最终得到滑动状态检测准确率为 98.88%,可以实时精准检测机械手把握目标时的初始滑移状态。

本文重点研究了机械手指尖滑动觉感知,但在柔性封装工艺、热觉复合感知、传感器空间结构等方面还可进行深入研究:

- 1) 提升柔性体封装工艺水平,选取杨氏模量适中和泊松比更接近于人体新型柔性材料,可优化封装体轴向变形能力,增强 FBG 触滑觉感知能力;
- 2) 研究机械手把握过程热觉感知补偿机制,选取合适的热触觉动态解耦方法,减小温度对触滑觉检测的影响。

选取新型柔性封装材料,提升封装体工艺,构建合适温度补偿方法后,该技术可进一步应用于仿生触滑觉智能感知领域。

参考文献

[1] SUNDARAM S, KELLNHOFER P, LI Y Z, et al. Learning the signatures of the human grasp using a scalable tactile glove[J]. Nature, 2019, 569 (7758): 698-702.

[2] AW K, BUDD J, WILSHAW-SPARKES T. Data glove using soft and stretchable piezoresistive sensors [J]. Micromachines, 2022, 13(3) : 372.

[3] LIU W, YU P, GU C, et al. Fingertip piezoelectric tactile sensor array for roughness encoding under varying scanning velocity [J]. IEEE Sensors Journal, 2017,

17(21) : 6867-6879.

[4] YU H C, CHENG C L, WU P H, et al. Elastic capacitive tactile array pressure sensor system [J]. Sensors & Materials, 2017, 29: 885-895.

[5] 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 tactile and sliding composite sensing based on fiber Bragg grating [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2) : 40-46.

[6] 韩国庆, 刘显明, 雷小华, 等. 光纤传感技术在航空发动机温度测试中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1) : 145-164.

HAN G Q, LIU X M, LEI X H, et al. Application of optical fiber sensing in aero-engine temperature test [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2022, 43(1) : 145-164.

[7] HU J M, ZHOU Z D, LIU Q, et al. Key point selection in large-scale FBG temperature sensors for thermal error modeling of heavy-duty CNC machine tools [J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2019, 14(4) : 442-451.

[8] 钱牧云, 余有龙, 李慧, 等. 基于光纤光栅的机械手指触滑觉传感研究 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4) : 730-736.

QIAN M Y, YU Y L, LI H, et al. Research on tactile and sliding sensing of the mechanical finger based on the fiber Bragg grating [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4) : 730-736.

[9] 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.

[10] 刘春辉, 刘智超, 殷礼鑫. 光纤感知阵列在线滑觉测试系统 [J]. 红外与激光工程, 2022, 51 (3): 425-431.

LIU CH H, LIU ZH CH, YIN L X. On-line slippage measurement system for optical fiber sensing array [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51 (3): 425-431.

[11] 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.
- [12] YI Z, XU T, SHANG W, et al. Genetic algorithm-based ensemble hybrid sparse ELM for grasp stability recognition with multimodal tactile signals [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 70(3): 2790-2799.
- [13] FENG J H, JIANG Q. Slip and roughness detection of robotic fingertip based on FBG [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 287: 143-149.
- [14] XU J. Application of traditional graphic elements based on fiber bragg grating tactile sensor technology [J]. Journal of Sensors, 2021, 2021: 1-9.
- [15] LU G, FU S, XU Y. Design and experimental research of robot finger sliding tactile sensor based on FBG [J]. Sensors, 2022, 22(21): 8390.
- [16] 孙丽, 孙欣欣, 梁天琦, 等. 3D 打印封装光纤光栅传感器应变传递机理研究 [J]. 光子学报, 2021, 50(9): 80-94.
- SUN L, SUN X X, LIANG T Q, et al. Study on strain transfer mechanism of three dimensions printing encapsulated fiber bragg grating sensor [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(9): 80-94.
- [17] 张亚楠, 胡旭东, 刘兵飞. 基于应变传递的形状记忆合金复合材料损伤监测模型 [J]. 复合材料学报, 2023, 41: 1-9.
- ZHANG Y N, HU X D, LIU B F. Damage monitoring model of shape memory alloy composites based on strain transfer [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 41: 1-9.
- [18] SHAH F A, TANTARY A Y. Wavelet transforms: Kith and kin [M]. CRC Press, 2022.

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. He is currently a professor and a master advisor at Chongqing Jiaotong University. His main research interests include precision instruments and machinery and smart sensor technology.