

文章编号 1004-924X(2018)12-2991-07

用于纹理探测的磁致伸缩触觉传感器

王博文^{1,2*}, 王晓东^{1,2}, 李云开^{1,2}, 万丽丽^{1,2}, 郑文栋^{1,2}, 魏佳琪^{1,2}

(1. 河北工业大学 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 天津 300130;
2. 河北工业大学 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室, 天津 300130)

摘要: 为了实现对不同物体表面微观结构的检测, 并判断出不同物体的粗糙度和细密度, 利用铁镓合金材料(Galfenol)的逆磁致伸缩效应设计并制作了一种高精度和高响应的纹理探测触觉传感器。基于欧拉-伯努利梁结构动力学理论、磁致伸缩材料线性本构方程和法拉第电磁感应定律建立了纹理表面微观结构与输出电压之间的关系。实验结果表明: 在粗糙度大于 6.5 的范围内, 传感器可以精确识别物体的粗糙度; 在细密度大于 6 的范围内, 提取谐波频率的方法对细密度的识别具有较高的灵敏度; 在细密度小于 6 的范围内, 提取功率谱重心的方法对细密度的识别具有较高的灵敏度。因此, 利用传感器获得的信号, 通过特征值提取可以表征物体的粗糙-光滑、稀疏-细密属性。

关键词: 铁镓合金; 磁致伸缩逆效应; 纹理探测; 粗糙度; 细密度

中图分类号: TP212.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182612.2991

Magnetostrictive tactile sensor for texture detection

WANG Bo-wen^{1,2*}, WANG Xiao-dong^{1,2}, LI Yun-kai^{1,2},
WAN Li-li^{1,2}, ZHENG Wen-dong^{1,2}, WEI Jia-qi^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment,
Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;
2. Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of
Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)
* Corresponding author, E-mail: bwwang@hebut.edu.cn

Abstract: Texture is the embodiment of the distribution of surface microstructure. Tactile texture is a crucial factor to consider for improvement of the perception and exerting control over the environment of the material. In this study, a highly accurate and responsive tactile sensor was designed and fabricated using the inverse magnetostrictive effect of Galfenol to detect the surface microstructure of different objects and determine their roughness and fine density. Based on the Euler-Bernoulli beam dynamics theory, linear constitutive equations of magnetostrictive materials, and Faraday's law of electromagnetic induction, a relationship was established between the microstructure of the textured surface and the output voltage. The experimental results showed that the sensor had high sensitivity to object roughness recognition for roughness greater than 6.5. For fineness greater than 6, the method of extracting harmonic frequency was highly sensitive in identifying fineness. However, when the

收稿日期: 2018-01-19; 修订日期: 2018-03-02.

基金项目: 河北省自然科学基金项目资助(No. E2017202035, No. E2016202034)

fineness was less than 6, the method of extracting the center of gravity of the power spectrum had high sensitivity for the identification of fineness. These results showed that the signal obtained by the sensor could be used to characterize the rough-smooth and sparse-fine attributes of different objects by eigenvalue extraction.

Key words: Galfenol; magnetostrictive inverse effect; texture detection; roughness; fine density

1 引言

纹理是物体表面微观结构分布特征的体现,纹理触觉是提高对环境的感知和控制能力不可缺少的因素。纹理触觉信息的检测在虚拟手术仿真、遥操作机器人控制、网上购物以及虚拟博物馆触觉体验等领域具有重要作用^[1-3]。在远程遥操作系统中,当视觉提供的信息不足以描述物体时,物体表面的纹理信息便成为判断其性质的重要依据。目前,国内外研究者设计了诸多触觉传感器。张冬至等基于电活性聚合物薄膜设计了柔性触觉传感器^[4]。吴俊杰等基于非硅 MEMS 工艺,开发了一种可用于微纳米尺度三维尺寸测量的电容式微触觉传感器^[5]。然而,有关电磁式触觉传感器的研究甚少。

研究发现,新型 Fe-Ga 磁致伸缩材料具有成本低、机械性能好、响应时间短的特点^[6-7],可以作为电磁式传感器的核心材料^[8-10]。本文基于磁致伸缩逆效应,考虑生物力学特征,应用 Fe-Ga 材料设计、制作了一种新型用于纹理探测的触觉传感器,并以该传感器为核心制作了纹理探测装置。应用纹理探测装置测试了纹理表面的电压信号,分析了测试数据,确定了表征物体表面粗糙-光滑、稀疏-细密的特征量。

2 触觉传感器的结构设计

由仿生学原理,手指与外界物体接触时,手指皮肤深层的机械感受器将产生响应的动作电位^[11]。基于生物学特征,触觉传感器的核心元件 Fe-Ga 磁致伸缩材料类似于手指皮肤深层的机械感受器,外壳由与人手指皮肤具有相同弹性的硅胶包裹,从外观上和人的手指基本相同。设计的触觉传感器主要由 Fe-Ga 磁致伸缩片状材料、检测线圈、永磁体、刚性触头和硅胶外壳等组成,如图 1 所示。

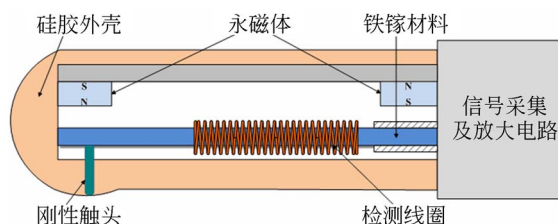


图 1 触觉传感器的结构

Fig. 1 Structure of texture tactile sensor

Fe-Ga 磁致伸缩片状材料一端固定在非导磁材料的外壳上,另一端与刚性触头连接。Fe-Ga 片状材料的上方有两个永磁体,为 Fe-Ga 片状材料的主体部分提供均匀分布的偏置磁场。左边的永磁体下端为 N 极,右边永磁体的下端为 S 极,通过左边永磁体、Fe-Ga 片状材料和右端永磁体构成磁路。在靠近 Fe-Ga 片状材料固定端的一侧有长为 l 、匝数为 n 的检测线圈。刚性触头在纹理表面滑动引起 Fe-Ga 片状材料发生振动,导致 Fe-Ga 片状材料中的磁畴运动,使得 Fe-Ga 片状材料内部的磁感应强度发生变化。基于法拉第电磁感应定律,利用检测线圈将磁感应强度的变化转化为电压信号并通过放大电路输出,从而通过感应电压信号来检测目标物体的表面纹理特征。设计的磁致伸缩传感器可以装配在机械手上进行实验,其实物如图 2 所示。

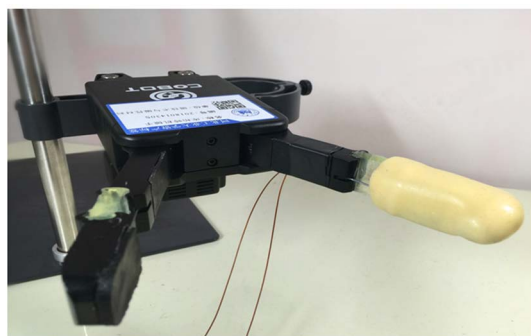


图 2 装配在机械手上的磁致伸缩传感器

Fig. 2 Magnetostrictive sensor mounted on mechanical hand

3 触觉传感器的输出模型

传感器为悬臂梁结构,梁的轴方向为其长度方向 z 轴方向为梁的竖直方向 ($x=0$),也是固定端。基于法拉第电磁感应定律,在 Fe-Ga 磁致伸缩片状材料 x 轴向上,长为 Δl 的线圈产生感应电压 $\Delta u(t)$ 可表示为:

$$\Delta u(t) = -\Delta l \frac{nSdB}{l \frac{dt}{dt}}, \quad (1)$$

式中: n 为线圈的匝数, S 为线圈的横截面积, l 为线圈长度。基于 Fe-Ga 的线性本构方程为:

$$B = d\sigma_m + \mu H, \quad (2)$$

$$\epsilon = \frac{\sigma_m}{E_m} + dH, \quad (3)$$

式中 σ_m , d , E_m 和 μ 分别为铁镓材料的 x 轴向应力、磁机耦合压磁系数、杨氏模量和磁导率。得 Fe-Ga 层的磁感应强度为:

$$B = dE_m \epsilon + (\mu - d^2 E_m) H_b, \quad (4)$$

式中 H_b 为偏置磁场。传感器工作时 Fe-Ga 片状材料振幅较小,可以认为偏置磁场为常数。

将式(4)代入式(1),令 $\Delta u(t) \rightarrow du(t)$ 和 $\Delta l \rightarrow dx$,并对所得方程关于 x 轴向积分,可得线圈两端输出的总电压为:

$$u(t) = -\frac{ndE_m S}{l} \int_0^l \frac{d\epsilon}{dt} dx. \quad (5)$$

悬臂梁在厚度 z 处的 x 轴向应变为:

$$\epsilon = -z \frac{\partial^2 \omega(x, t)}{\partial x^2}, \quad (6)$$

式中 $\omega(x, t)$ 为铁镓材料 x 轴向任意一点处的挠度。

将式(6)代入式(5),得:

$$u(t) = G \int_0^l \frac{\partial^3 \omega(x, t)}{\partial x^2 \partial t} dx, \quad (7)$$

式中 $G = \frac{ndE_m S z}{l}$ 为悬臂梁的机电耦合系数。该系数由传感器的结构参数决定。

由式(7)可以看出,输出电压与扰度有关,挠度反映了悬臂梁的振幅大小,而振幅由被测物体的纹理决定。不同纹理面的微观结构复杂程度不同,基于特定的数学模型和几何约束条件可以建立纹理的触觉表达式^[12]。传感器触头在探测过程中跟踪的表面构成一个偏移面,如图 3 所示。偏移

面的波动使传感器触头在探测过程中产生振动。

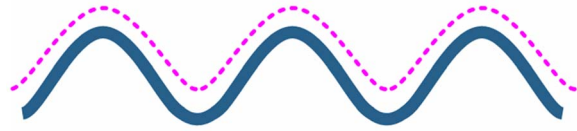


图 3 偏移面结构

Fig. 3 Offset surface

图 3 中实线为纹理面的近似模型,触头在纹理表面移动时所形成的偏移曲线近似为正弦曲线,如图 3 中虚线所示,可表达为:

$$y_s = A \sin\left(\frac{2\pi}{\tau} t\right) = A \sin\left(\frac{2\pi v}{\lambda} t\right), \quad (8)$$

式中: A 为正弦曲线的振幅,表征物体的纹理单元高度; λ 为波长,表征物体表面相邻纹理单元的间距; v 为触头在纹理面滑动的速度。

传感器触头的偏移振动带动悬臂梁端点振动,所以式(8)即为悬臂梁端点处的挠度,由悬臂梁挠度与应力的关系可得到任意一点的挠度为:

$$\omega(x, t) = \frac{y_s x^2}{2L^3} (3L - x). \quad (9)$$

将式(9)代入式(7),得:

$$u(t) = \frac{G 2\pi v A}{\lambda} \left(\frac{3l}{L^2} - \frac{3l^2}{2L^3}\right) \cos\left(\frac{2\pi v}{\lambda} t\right). \quad (10)$$

式(10)为输出电压与纹理表面特征值之间的关系。纹理单元高度与相邻纹理单元间距的比值 A/λ 反映了物体自身的粗糙程度^[12],输出信号峰值与 A/λ 的关系为:

$$u'(t) = 2K\pi v G \left(\frac{3l}{L^2} - \frac{3l^2}{2L^3}\right) \frac{A}{\lambda}, \quad (11)$$

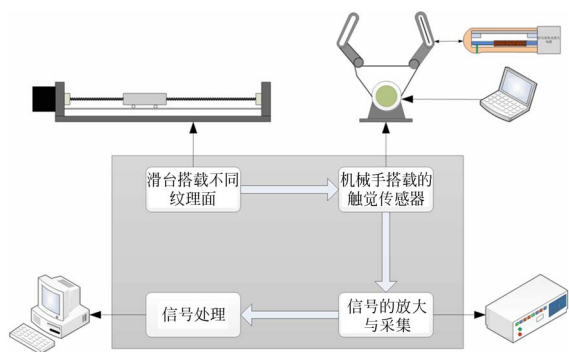
式中: $G = \frac{ndE_m S z}{l}$, K 为放大电路的放大倍数, A 为纹理单元的高度, λ 为相邻纹理单元的间距。

4 实验结果与分析

4.1 传感器输出特性与实验验证

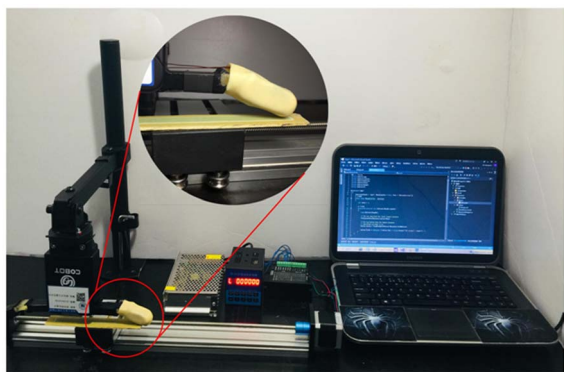
实验所搭建的纹理探测系统由纹理触觉传感器、机械手、滑台、电机控制组件和示波器等组成,探测系统与实物图如图 4 所示。所选用的滑台为 ST 型丝杆电动直线滑台,滑台的精度为 0.2 mm,高于样本自身的粗糙度等级。将被测纹理面固定在滑台上,通过控制电机的运转速度来调

节纹理面的相对运动速度。将纹理触觉传感器搭载到库柏特机械手上,通过电脑编程来控制机械手指的位置,进而调节传感器与纹理面的接触力,用示波器来采集检测线圈检测到的电压信号。



(a) 纹理探测系统框图

(a) Block diagram of texture detection system



(b) 纹理探测系统实物图

(b) Physical diagram of texture detection system

图 4 纹理探测系统图

Fig. 4 Texture detection system

应用式(11)计算得到的输出信号峰值与 A/λ 的关系曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出,纹理表面的粗糙程度越大,输出电压的峰值越大。

实验中选取牛仔布、尼龙丝带、薄纱、纱布和粗布作为测试对象,如表 1 所示。对每种样品进行主观触觉感知实验,描述被测样品的粗糙-光滑、稀疏-细密程度。并对主观实验结果进行评分,所得结果一并列于表 1。样本粗糙度分值越大,样本的粗糙程度越大。

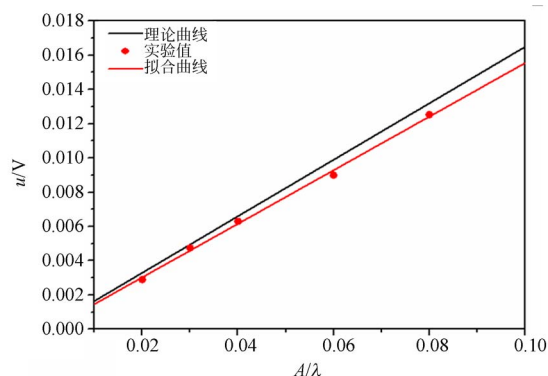


图 5 输出信号峰值与 A/λ 的关系曲线

Fig. 5 Relationship between peak value of output signal and A/λ

表 1 织物样本表面粗糙-光滑、稀疏-细密维度的分值

Tab. 1 Scores of rough-smooth and coarse-fine dimensions of fabric samples

样本编号	名称	粗糙度	细密度
1	尼龙丝带	8.56 ± 0.9	8.1 ± 1.3
2	牛仔布	7.40 ± 1.0	6.5 ± 1.0
3	粗布	6.55 ± 0.8	4.9 ± 0.7
4	薄纱	6.05 ± 0.5	7.3 ± 1.3
5	纱布	5.35 ± 0.9	4.0 ± 0.5

每种样本在相同条件下进行 6 次测试,取测试数据的平均值。在每种测试结果的输出信号中选取均匀的 12 500 个样点,分成矩阵,在矩阵的每一列提取最大值,得到的输出信号峰值与采样序号的关系如图 6 所示(彩图见期刊电子版)。由图 6 可见,样本 1 到样本 5 的峰值逐渐减小,说明从样本 1 到样本 5 的粗糙程度依次减小,并且每种样本的粗糙程度相差不均匀。

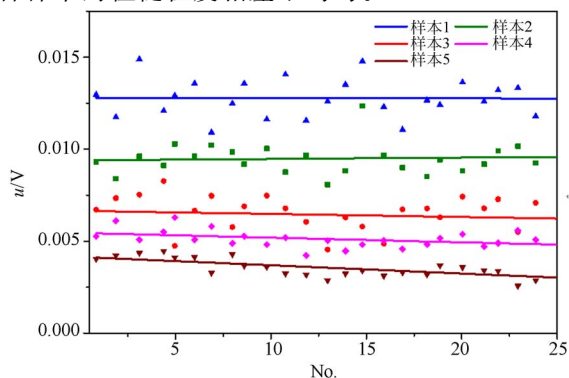


图 6 输出信号峰值与采样序号的关系

Fig. 6 Relationship between output signal peak and sample number

实验得到的输出信号峰值与 Λ/λ 的关系曲线如图 5 所示。从图 5 可见,实验值与理论值基本一致,表明可以应用式(11)描述传感器的输出信号峰值与 Λ/λ 的关系。

4.2 触觉传感器纹理识别

4.2.1 粗糙度识别

利用纹理探测系统对表 1 中样本进行检测,经过滤波和放大后得到不同纹理的振动输出信号,如图 7 所示。从图 7 可以看出,不同的纹理面采集到信号不同,反映出表征纹理面特征的物理量不同。

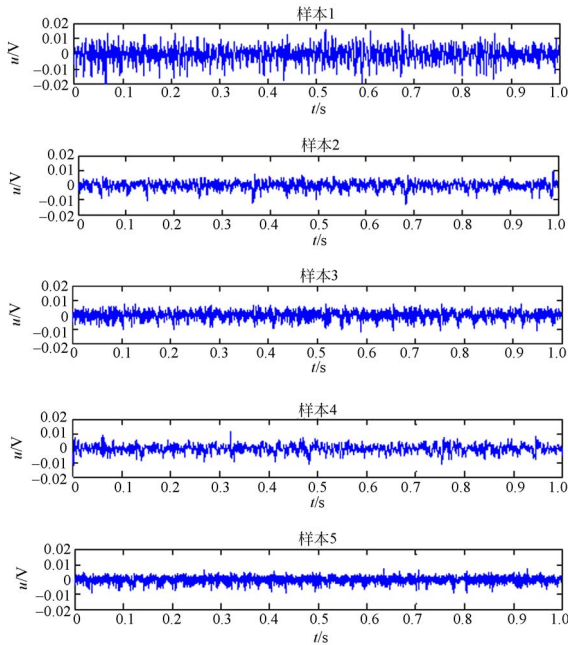


图 7 不同纹理样本的输出信号

Fig. 7 Output signals of different texture samples

粗糙度与纹理表面的颗粒感和能量传递有关^[14]。平均功率可以描述接触面间的能量传递,峰值均值可以描述纹理表面的颗粒感,所以用振动信号的平均功率和峰值均值来表征粗糙度。对 5 种振动信号提取平均功率和峰值均值,结果分别如图 8 和图 9 所示。由图 8 和图 9 可以看出,峰值均值和平均功率随着粗糙度的升高而升高,所以利用传感器得到的信号通过特征值提取能够描述不同纹理的粗糙程度。在粗糙程度大于 6.5 时,峰值均值和平均功率随粗糙度的增加而快速增加,表明设计的传感器可准确区分粗糙程度较大的物体纹理。

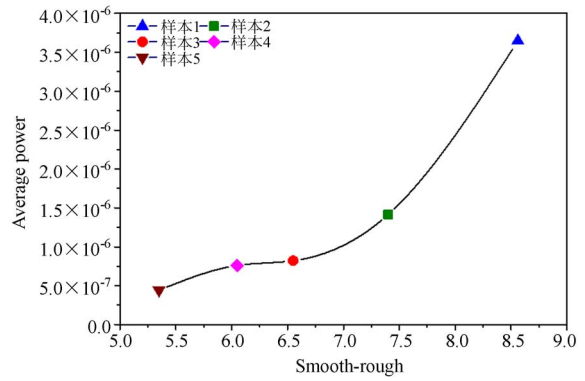


图 8 不同样本的平均功率

Fig. 8 Average power of different samples

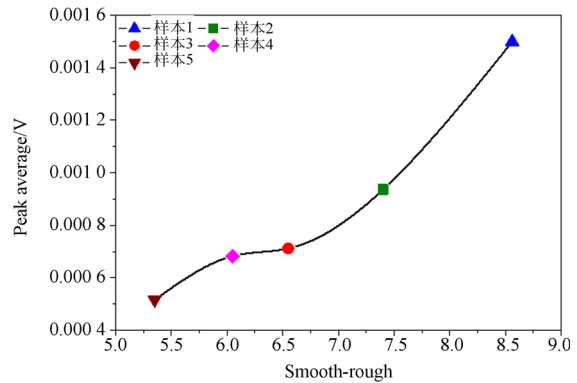


图 9 不同样本的电压峰值均值

Fig. 9 Peak average of different samples

4.2.2 细密度识别

人在触摸物体表面时,物体表面纹理单元的高度、间距、结构组成成分都会影响主观感觉的辨别,从振动的时域信号不能准确地描述所有主观感觉,因此需要从频域范围分析表面纹理信号的谐波组成和特征。将样本的振动输出信号进行频谱变换,得到不同样本的频谱图,如图 10 所示。

纹理表面稀疏-细密程度主要通过振动信号频谱的谐波最高峰对应频率和功率谱重心来表征。空间周期是描述纹理特征的常用参数^[15]。由式(10)可以得到,振动输出信号的频率为 v/λ ,所以频率的不同反映了不同物体纹理空间周期的差异。频率越高空间周期越小,对应的纹理越细密。

Fishel 和 Loeb 发现功率谱重心可以描述纹理分布^[16]。功率谱重心与触摸纹理时的振动频率密切相关。振动信号频率越高,功率谱重心越大,表明经纬密度越大,表面纹理越细密;功率谱重心越小,表明经纬密度越小,表面纹理越稀疏。

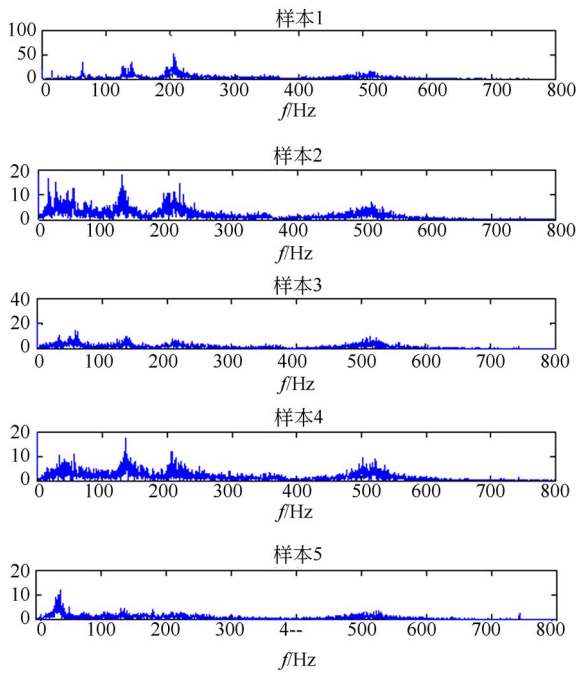


图 10 不同样本的频谱图

Fig. 10 Spectrum diagram of different samples

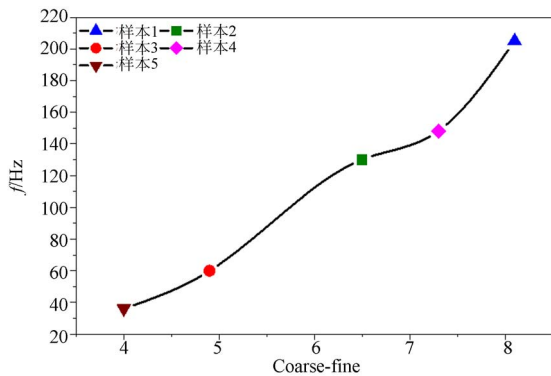


图 11 不同样本的谐波频率

Fig. 11 Harmonic wave frequency of different samples

由图 10 提取谐波最高峰所对应的频率和功率谱重心,分别如图 11 和图 12 所示。由图 11 和图 12 可以看出,谐波频率和功率谱重心随着物体

参考文献:

- [1] BULATOV V, GARDNER J. Visualization by people without vision[J]. *Workshop on Content Visualisation & Intermediate Representations*, 1998:103-108.
- [2] FRITZ J P, BARNER K E. Design of a haptic data visualization system for people with visual impairments

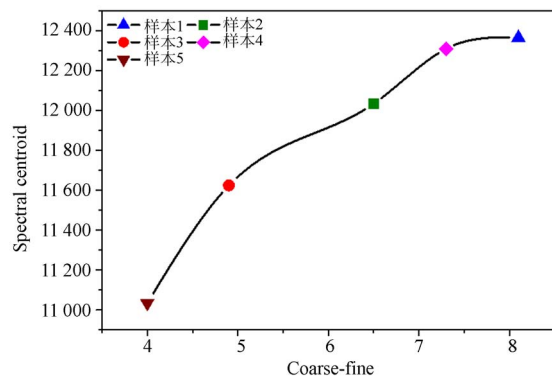


图 12 不同样本的功率谱重心

Fig. 12 Spectral centroid of different samples

纹理的细密程度增加而升高。在细密度小于 6 的范围内,相对于谐波频率,功率谱重心对细密度的升高变化显著。在细密度大于 6 时,功率谱重心随细密度的升高变化不显著,而谐波频率随着细密度的升高变化得非常显著。所以,在细密度较大时,利用信号的谐波频率可以更准确地分辨不同的物体细密度。在细密度很小时,利用功率谱重心可以更准确地区分不同物体细密度。

5 结 论

本文设计并制作了一种高精度和高响应的纹理探测触觉传感器,建立了纹理表面微观结构与输出电压之间的关系。采用纹理触觉传感器对 5 种不同织物样本进行检测,经过滤波和放大之后将得到的振动电压信号进行特征值提取。结果显示:在粗糙度大于 6.5 的范围内,传感器对物体粗糙度识别的灵敏度较高;在细密度大于 6 的范围内,提取谐波频率的方法对细密度的识别灵敏度高;在细密度小于 6 的范围内,提取功率谱重心的方法对细密度的识别灵敏度高。由此表明,传感器获得的信号通过特征值提取可以表征物体的粗糙-光滑、稀疏-细密属性,其结果与主观感知一致。

[J]. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering - A Publication of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society*, 1999, 7(3):372.

- [3] JANSSON G, BERGAMASCO M, FRISOLI A. A new option for the visually impaired to experience 3D art at museums: manual exploration of virtual copies[J]. *Visual Impairment Research*, 2009, 5(1):1-12.

- [4] 张冬至,童俊,刘哲,等.基于电活性聚合物薄膜柔性器件的触觉传感特性[J].光学精密工程,2014,22(8):2151-2158.
ZHANG D ZH, TONG J, LIU ZH, *et al.*. Tactile sensing characteristics of electroactive polymer film based flexible devices [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8):2151-2158. (in Chinese)
- [5] 吴俊杰,李源,李东升,等.MEMS电容式三维微触觉测头设计及校准[J].光学精密工程,2013,21(12):3087-3094.
WU J J, LI Y, LI D SH, *et al.*. Design and calibration of 3D micro tactile probe based on MEMS capacitance sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12):3087-3094. (in Chinese)
- [6] 翟鹏,肖博涵,贺凯,等.超磁致伸缩致动器的复合反馈控制及其在变椭圆销孔精密加工中的应用[J].光学精密工程,2016,24(6):1389-1398.
ZHAI P, XIAO B H, HE K, *et al.*. Composite backward control for GMA and its application in high precision machining of variable ellipse pinhole [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6):1389-1398. (in Chinese)
- [7] 黄文美,薛胤龙,王莉,等.考虑动态损耗的超磁致伸缩换能器的多场耦合模型[J].电工技术学报,2016,31(7):173-178.
HUANG W M, XUE Y L, WANG L, *et al.*. Multi-field coupling model considering dynamic losses for giant magnetostrictive transducers [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(7):173-178. (in Chinese)
- [8] 王博文,张露予,王鹏,等.磁致伸缩位移传感器检测信号分析[J].光学精密工程,2016,24(2):358-364.
WANG B W, ZHANG L Y, WANG P, *et al.*. Analysis of detection signal for magnetostrictive displacement sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2):358-364. (in Chinese)
- [9] 曹淑瑛,桑杰,郑加驹,等.Galfenol悬臂梁能量采集器的机电耦合动态模型[J].中国电机工程学报,2015,35(21):5623-5631.
CAO SH Y, SANG J, ZHENG J J, *et al.*. Mechanical-electro coupled dynamic model of Galfenol cantilever energy harvester [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(21):5623-5631. (in Chinese)
- [10] 王福吉,贾振元,刘巍,等.复合薄膜磁致伸缩系数求解及悬臂梁结构优化[J].光学精密工程,2011,19(8):1832-1837.
WANG F J, JIA ZH Y, LIU W, *et al.*. Calculation of magnetostrictive coefficient of composite thin film and structure optimization of cantilever [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8):1832-1837. (in Chinese)
- [11] JOHNSON K O, YOSHIOKA T, VEGABER-MUDEZ F. Tactile functions of mechanoreceptive afferents innervating the hand [J]. *Journal of Clinical Neurophysiology Official Publication of the American Electroencephalographic Society*, 2000, 17(6):539.
- [12] OTADUY M A, LIN M C. A perceptually-inspired force model for haptic texture rendering [C]. *Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*. ACM, 2004:123-126.
- [13] ATULASIMHA J, FLATAU A B. A review of magnetostrictive iron-gallium alloys [J]. *Smart Materials & Structures*, 2011, 20(4):043001.
- [14] BENSMA S, HOLLINS M. Pacinian representations of fine surface texture [J]. *Perception & Psychophysics*, 2005, 67(5):842-854.
- [15] ODDO C M, CONTROZZI M, BECCAI L, *et al.*. Roughness encoding for discrimination of surfaces in artificial active-touch [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, 27(3):522-533.
- [16] FISHEL J A, LOEB G E. Bayesian exploration for intelligent identification of textures [J]. *Frontiers in Neurorobotics*, 2012, 6(6):4.

作者简介:



王博文(1956—),男,辽宁沈阳人,教授,博士生导师,1995年于中国科学院金属研究所获得博士学位,1997年于东北大学完成博士后研究工作,主要从事磁性材料与器件的研究。E-mail: bwwang@hebut.edu.cn



王晓东(1992—),男,河北承德人,硕士研究生,2015年于河南工业大学获得学士学位,主要从事磁性材料与器件的研究。E-mail: xiaodong8010@163.com