

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.11.002

基于均匀微突结构的高灵敏柔性电容压力传感器

刘彩霞^{1,2}, 李帅², 胡若海², 陈恒¹, 张玉刚²

(1. 合肥工业大学 物理学院, 安徽 合肥 230601; 2. 合肥工业大学 微电子学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:针对可穿戴医疗设备、电子皮肤、柔性触摸显示屏等对高灵敏柔性压力传感器的感知需求,文章基于纳米氧化锌(ZnO)、酞酸酯偶联剂(PN-105,PN)和室温硫化硅橡胶(room temperature vulcanized silicone rubber,RTV)材料,结合丝网印刷技术制备具有均匀微突阵列结构、ZnO-PN/RTV介电层的柔性电容式压力传感器,并对其传感机制和特性进行测试研究。结果表明:所研制的柔性电容式压力传感器具有高灵敏度(1.2 kPa^{-1})、快速响应(40 ms)、低检测限(2 Pa)、高使用寿命($>5\ 000$ 次)和良好的人体适用性;制备的 $5\text{ cm}\times 5\text{ cm}$ 压力阵列能够满足可穿戴设备和柔性电子产品需求。该传感器灵敏度高且制作工艺简单、成本低,在柔性智能传感和服务机器人等领域具有良好的应用前景。

关键词:电容式柔性传感器;介电层;微突起结构;高灵敏

中图分类号:TP212.1

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2024)11-1448-06

Highly sensitive capacitive flexible pressure sensor based on uniform micro-protrusion structure

LIU Caixia^{1,2}, LI Shuai², HU Ruohai², CHEN Heng¹, ZHANG Yugang²

(1. School of Physics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: Aiming at the sensing requirements of highly sensitive flexible pressure sensors for wearable medical devices, electronic skin, flexible touch screen, etc., based on nano zinc oxide(ZnO), phthalic acid coupling agent(PN-105,PN) and room temperature vulcanized silicone rubber(RTV), combined with screen printing technology, this paper prepared a capacitive flexible pressure sensor with uniform micro-protrusion array structure and ZnO-PN/RTV dielectric layer, and tested its sensing mechanism and characteristics. The results show that the developed capacitive flexible pressure sensor has high sensitivity(1.2 kPa^{-1}), fast response (40 ms), low detection limit (2 Pa), high service life ($>5\ 000$ times) and good human applicability. Prepared $5\text{ cm}\times 5\text{ cm}$ pressure array can meet the needs of wearable devices and flexible electronic products. The sensor has high sensitivity, simple manufacturing process and low cost, and has good application prospects in the fields of flexible intelligent sensors and service robots.

Key words: capacitive flexible sensor; dielectric layer; micro-protrusion structure; highly sensitive

柔性压力传感器由于在可穿戴医疗设备^[1]、电子皮肤^[2]、柔性触摸屏^[3]等领域的广泛应用而备受关注,其工作原理可分为电阻式^[4]、压电式^[5]和电容式^[6]等。在各种传感机制的柔性压力传感

器中,电容式压力传感器因其结构简单、制备成本低、滞后小、功耗低等优点成为研究的热点之一。

为提升电容式传感器特性指标^[7]中的灵敏度,可以通过光刻、3D打印、静电纺丝等设计介电

收稿日期:2023-02-24

基金项目:浙江省“领雁”研发攻关计划资助项目(2022C03052);教育部产学研合作协同育人资助项目(220604730212902)

作者简介:刘彩霞(1975—),女,河南禹州人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师。

层弹性微结构^[8-10],从而降低材料压缩模量、提高材料可压缩性。文献[11]通过阳极氧化铝模板图案转移法制备了双面纳米柱介电层,传感器灵敏度为 0.35 kPa^{-1} ;文献[12]采用光刻方法制备微柱聚偏氟乙烯(PVDF)介电层,传感器灵敏度为 0.43 kPa^{-1} ;文献[13]采用静电纺丝制成 Mxene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$)/聚偏氟乙烯三氟乙烯(PVDF TrFE)复合纳米纤维介电层,灵敏度为 0.51 kPa^{-1} ;文献[14]通过石墨烯(GNPs)/多壁碳纳米管(MWCNTs)/硅橡胶复合材料在聚氨酯海绵基板上制备微孔介电层,灵敏度为 0.062 kPa^{-1} 。为进一步在构造出弹性结构时能兼顾高灵敏度、简单低成本制造技术,本文结合硅橡胶复合材料提出一种可扩展、低成本和实用性强的三维结构介电层制造技术。

本文利用酞酸酯偶联剂(PN-105,PN)改性纳米氧化锌(ZnO)填充室温硫化硅橡胶(room temperature vulcanized silicone rubber,RTV)材料,采用丝网印刷工艺制备均匀微突起阵列结构 ZnO-PN/RTV 介电层,所研制的柔性电容式压力传感器具有高灵敏度(1.2 kPa^{-1})、低响应时间(40 ms)、低检测极限(2 Pa)和高使用寿命(>5 000 次)等优点。传感器成功应用于生理刺激监测和皮肤感知阵列,在可穿戴实时医疗监测、交互式人机界面等领域具有良好的应用前景。

1 传感器制作

传感器的制作流程如图 1 所示。

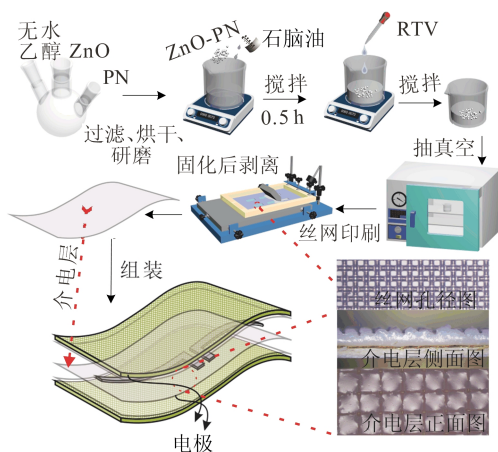


图 1 传感器制作流程

1) 材料制备。取 3 g 纳米 ZnO 倒入装有适量无水乙醇溶液的三口烧瓶,高速搅拌 2 h,置于 $45 \text{ }^\circ\text{C}$ 水浴锅中,低速搅拌待温度恒定后缓慢滴加溶有 2% 酞酸酯偶联剂的无水乙醇溶液,反应

2.5 h,经抽滤、 $125 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干 3 h、研磨、过 6 000 目筛得纳米 ZnO-PN 粉末;向烧杯中加入石脑油,并加入一定质量分数的纳米 ZnO-PN 颗粒进行搅拌分散,30 min 后加入 RTV 继续搅拌至石脑油完全挥发,放入真空箱内抽出多余气泡后获得 ZnO-PN 改性 RTV 复合材料。

2) 丝网印刷工艺微结构制作。定制不同尺寸网孔板(网孔边长为 50、100、150、200、300 μm 的正方形网孔板),将调制好的 ZnO-PN 改性 RTV 复合材料涂布在丝网板上进行手工丝网印刷,印刷速度为 5 mm/s,刮刀和丝网印刷角度控制在 45° ,每次印刷的浆料厚度约为 60 μm ;将印刷好的图案放入 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 的干燥箱中干燥 5 min 后剥离取下。

3) 组装。将结构化介电层切割成所需的尺寸和形状,涂有 RTV 粘接层的导电胶带置于介电层两侧,导线连接后用硅橡胶封装制得 ZnO-PN/RTV 均匀微突起阵列结构电容式传感器。

由制备微结构的丝网光学电镜图像和介电层光学电镜图像可以看出,丝网孔径均匀排列,经过丝网印刷后介电层的侧面和正面微结构均匀整齐,有利于电容式传感器在压缩过程中信号的稳定。

2 结果与讨论

2.1 传感器工作原理

柔性电容式压力传感器可以视为平行板电容器,其电容变化主要受两极板相对距离和介质层有效介电常数影响^[15]。

传感器电容 C 可表示为:

$$C = (\epsilon_e + \Delta\epsilon_e)A/(d - \Delta d) \quad (1)$$

其中, A 、 ϵ_e 、 $\Delta\epsilon_e$ 、 d 、 Δd 分别为电极正对面积、有效介电常数、有效介电常数的变化量、两极板相对距离、两极板相对距离的变化量。

电容式传感器的灵敏度为:

$$S = \left(\frac{\Delta C}{C_0}\right) \frac{1}{p} = \left(\frac{\Delta\epsilon_e d}{\epsilon_e} + \Delta d\right) \frac{1}{d - \Delta d} \frac{1}{p} \quad (2)$$

其中: S 为灵敏度; ΔC 为电容的变化量; C_0 为不施加压力时的初始电容; p 为施加的压力。

由式(2)可知,电容式传感器的灵敏度主要与介电层有效介电常数变化量和两极板间相对距离变化量有关,两者在相同压力下变化越大,灵敏度越高。对于 ZnO-PN/RTV 均匀微突起阵列结构介电层,外力作用下的形变会引起相对介电常数变化。根据 Lichtenecker 混合理论^[16],有效相对

介电常数 ϵ_c 为:

$$\ln \epsilon_c = V_{\text{air}} \ln \epsilon_{\text{air}} + V_{\text{ZnO}} \ln \epsilon_{\text{ZnO}} + V_{\text{RTV}} \ln \epsilon_{\text{RTV}} \quad (3)$$

由式(3)可知,当介电层微突结构被压缩排出空气,参与介电常数贡献的 ZnO、RTV 体积分数增加,材料的有效介电常数增加 ($\epsilon_{\text{air}} < \epsilon_{\text{RTV}} < \epsilon_{\text{ZnO}}$),电容传感器灵敏度得到提高。

2.2 硅橡胶改性与表征

RTV 因其优异的弹性和低压缩模量而被广泛使用,但是使用过程中力学性能会不断下降,作为介电层时相对介电常数较低。为使 RTV 具有高稳定性和高相对介电常数,需要对 RTV 进行改进。纳米 ZnO 作为橡胶工业中常用硫化活化剂,具有较高的介电常数,且用作改性填料能够提高材料的机械性能和使用寿命。因此,在 RTV 介电层中添加纳米 ZnO 颗粒可以提高传感器的灵敏度、稳定性和使用寿命等。

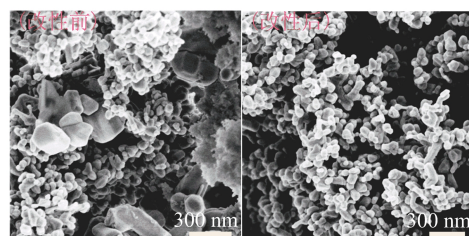
纳米 ZnO 具有亲水性和疏油性,在硅橡胶体系中分散时易出现团聚现象。利用 PN 对纳米 ZnO 进行改性,PN 分子中的烷氧基团与纳米 ZnO 表面的羟基发生异丙基取代反应,形成醚键,改变纳米 ZnO 疏油性,使其均匀分散在 RTV 中。

改性前、后纳米 ZnO 分散在 RTV 中的扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 图如图 2a 所示,50 000 倍 SEM 下可以明显看出,纳米 ZnO 经 PN 改性后均匀分散在 RTV 中,而未经改性的纳米 ZnO 则在 RTV 中出现团聚现象。其中纳米 ZnO 颗粒的形状为不规则球形,粒径为 40~50 nm。

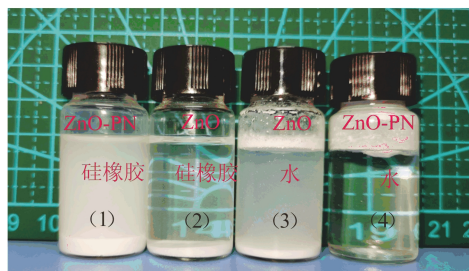
纳米 ZnO 改性前、后的亲水和亲油性测试如图 2b 所示。图 2b 中 4 个瓶子装有不同的溶液:(1)号瓶和(2)号瓶为 RTV;(3)号瓶和(4)号瓶为水。(2)号瓶和(3)号瓶溶液中加入的溶质为纳米 ZnO,(1)号瓶和(4)号瓶溶液中加入的溶质为改性纳米 ZnO-PN。对比测试结果可以发现,纳米 ZnO 改性后,由原来的亲水疏油特性变成了亲油疏水特性,亲油疏水特性使纳米 ZnO 能够均匀分散在 RTV 中。

纳米 ZnO、纳米 ZnO-PN 以及 PN 的傅里叶变换红外光谱 (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) 测试结果如图 2c 所示。从图 2c 可知,PN 分子中对应的亚甲基和甲基 (2845 cm^{-1} 和 2873 cm^{-1}) 的特征吸收峰分别出现在纳米 ZnO-PN 谱图中的 2893 cm^{-1} 和 2910 cm^{-1} 处。

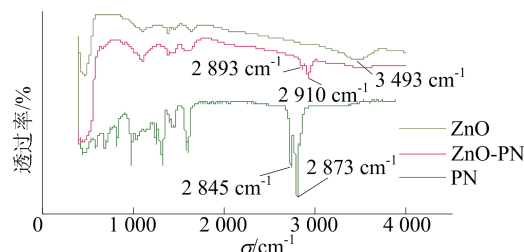
PN 分子中的烷氧基团与纳米 ZnO 表面的羟基反应形成醚键。纳米 ZnO 在 3493 cm^{-1} 处的表面羟基被消耗,图谱中 PN 另一端硬脂酸基团的长链结构赋予修饰的纳米 ZnO 良好的亲油性,使其均匀分散在 RTV 中。



(a) 改性前、后纳米 ZnO 分散在 RTV 中的 SEM 图



(b) 纳米 ZnO 改性前、后的亲水和亲油性测试



(c) 纳米 ZnO、纳米 ZnO-PN 以及 PN 的 FTIR 谱图

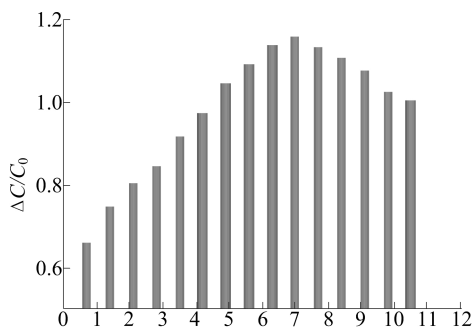
图 2 介电层特性表征

2.3 传感器性能检测

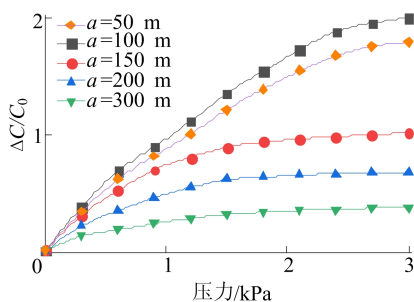
为提高传感器介电层的机械性能和相对介电常数,掺入高介电常数纳米 ZnO,随着加入比例的增加,具有微结构介电层的压缩模量相应提高,传感器产生相同压缩应变所需压力变大。纳米 ZnO 质量分数对电容变化量的影响如图 3a 所示,可以看出,当施加压力为 2 kPa、RTV 中纳米 ZnO 的质量分数为 7% 时传感器灵敏度最高。随着纳米 ZnO 质量分数的增加,介电层相对介电常数增加,传感器灵敏度增大,但加入更高质量分数的纳米 ZnO 时,会引起微结构介电层的压缩模量增大,而介电层相对介电常数的增大无法抵消模量增大对电容变化的影响,导致传感器灵敏度降低。

对不同丝网孔径制备的微突结构介电层的传感器灵敏度进行探究,网孔板的方形网孔边长 a 分别为 50、100、150、200、300 μm 。印刷网孔边长

对电容变化量的影响如图 3b 所示,可以看出,网孔边长为 100 μm 时,微突结构介电层在压力作用下容易发生变化,灵敏系数最高为 1.2 kPa^{-1} 。当网孔边长较大时,所得微观结构尺寸较大,微突结构在压缩过程中不易产生变形,电容变化量低,灵敏度低;当网孔边长较小时,介电层整体压缩模量增大,传感器灵敏度降低。为得到高灵敏度传感器,选择 100 μm 网孔边长进行丝网印刷制备微突起结构。



(a) 纳米ZnO质量分数对电容变化量的影响



(b) 印刷网孔边长对电容变化量影响

图 3 纳米 ZnO 质量分数、网孔边长与电容变化量的关系

传感器迟滞测试结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,迟滞测试结果显示出相对较小的塑性变形和较小的迟滞回差,而介电层复合材料 ZnO-PN/RTV 优异的机械性能是传感器迟滞较小的主要原因。

传感器最低检测限测试结果如图 5a 所示,可以看出,带有均匀微突起阵列结构的传感器可以区分低至 2 Pa 的压力,而能够检测微小压力的特点奠定了该传感器可以用于微弱生理信号检测。

传感器响应时间测试结果如图 5b 所示,可以看出,高灵敏带有均匀微突起阵列结构的传感器显示出对加载和卸载的快速响应,响应时间可达 40 ms,表明该传感器响应时间较短,可用于监测瞬态压力变化。

传感器阶梯力加载测试如图 5c 所示,可以看出,对传感器施加小负载下电容有明显压力响应,

表明该传感器具有较高的分辨精度。

传感器在不同压力下的重复测试如图 5d 所示,可以看出,当施加 1、2、5 kPa 的压力时,传感器仍具有良好的分辨率,对不同的力能呈现出不同的电容变化。

传感器在 4 kPa 压力下重复压缩 5 000 次后的电容响应曲线如图 5e 所示,可以看出,传感器没有出现电容漂移,表明带有均匀微突起阵列结构的传感器具有优异的稳定性和循环耐久性。

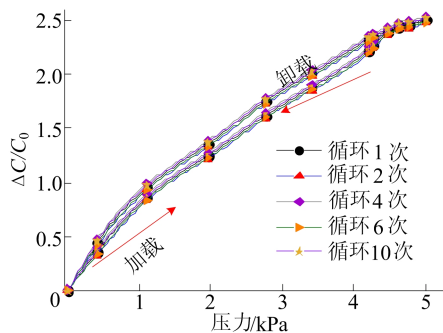
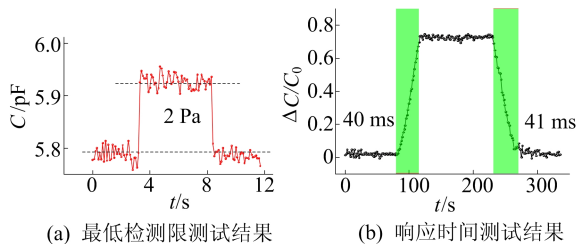
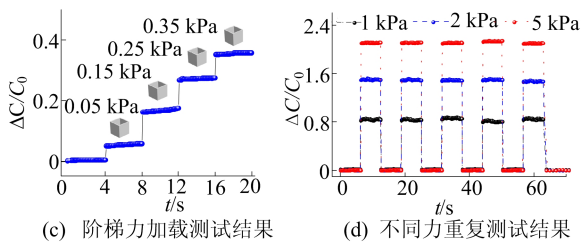


图 4 传感器迟滞测试结果



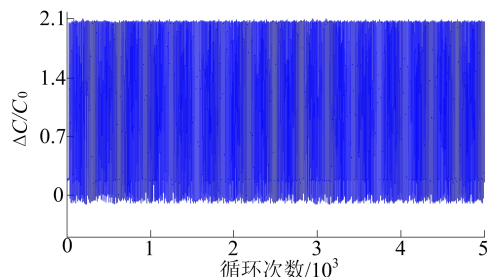
(a) 最低检测限测试结果

(b) 响应时间测试结果



(c) 阶梯力加载测试结果

(d) 不同力重复测试结果



(e) 循环加载测试结果

图 5 传感器的动态特性测试

2.4 传感器应用

将传感器贴于手腕,测量人体脉搏信号,结果如图 6a 所示,测试结果显示出稳定且可重复的脉搏波信号。带有均匀微突起阵列结构的传感器能

够准确感知脉搏的冲击波(P)、潮汐波(T)和双拍波(D)等特征,获得收缩压和舒张压、心率率和心率等人体生理参数^[17]。

将传感器贴于手臂,测量手臂运动信号,结果如图 6b 所示,可以看出,手臂弯曲及舒缓时电容明显变化,表明带有均匀微突起阵列结构的传感器可以感知手臂肌肉的运动^[18]。

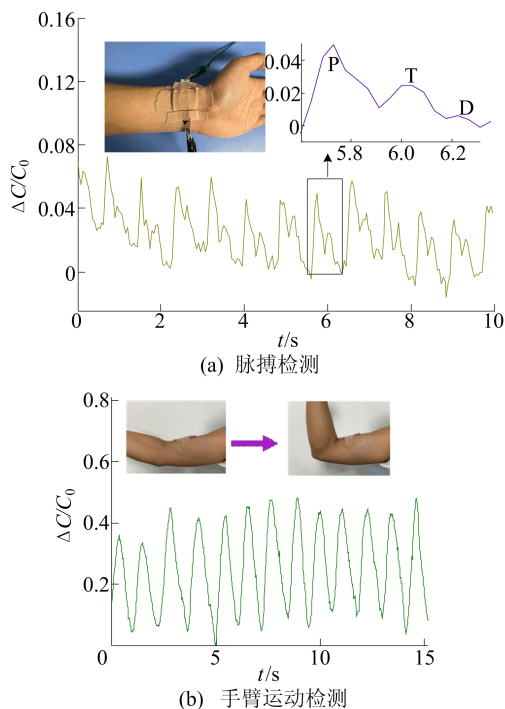


图 6 传感器生理信号检测结果

为识别手势、触摸点或触摸形状^[19],实现位置、形状等复杂检测功能,由纵、横各 5 条铜电极和微突结构介电层开发 5 cm×5 cm 的高分辨率传感器矩阵,如图 7a 所示,每个传感器的大小均为 5 mm×5 mm。

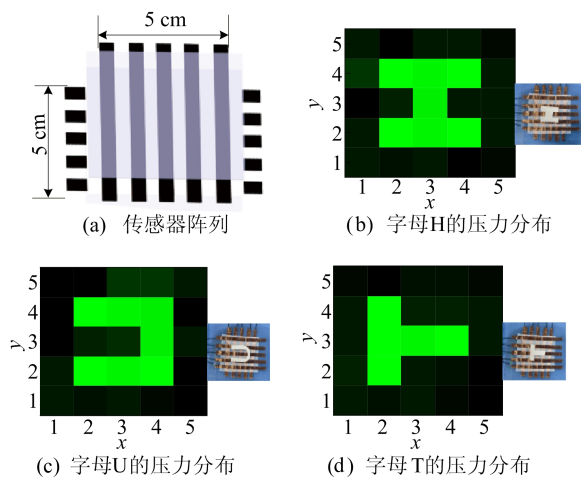


图 7 传感器阵列检测

3D 打印机打印出尼龙材料字母 H、U、T,放置于传感器阵列上,得到的压力信号如图 7b~图 7d 所示。由图 7 可知,传感器矩阵具有检测复杂形状触点的能力,且串扰较低。

3 结 论

本文基于 PN 改性纳米 ZnO 填充 RTV 的力敏复合介电材料,借助简单低成本的丝网印刷工艺,研制具有均匀微突起阵列结构的柔性电容式压力传感器。该传感器具有高灵敏度、快速响应、低检测极限和使用耐久性等优点,使其能够实时监测人体健康状况,适用于可穿戴医疗、人机交互和电子皮肤,在柔性智能传感和服务机器人等领域具有广泛的应用前景。

[参 考 文 献]

- [1] HUANG Y, WANG Z Q, ZHOU H F, et al. Highly sensitive pressure sensor based on structurally modified tissue paper for human physiological activity monitoring[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137(33): 48973.
- [2] CICEK M O, DOGANAY D, DURUKAN M B, et al. Seamless monolithic design for foam based, flexible, parallel plate capacitive sensors[J]. Advanced Materials Technologies, 2021, 6(6): 2001168.
- [3] CHOI H, OH J, KIM Y, et al. Transparent pressure sensor with high linearity over a wide pressure range for 3D touch screen applications[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(14): 16691-16699.
- [4] XIA P P, LIU P, WU S G, et al. Highly stretchable and sensitive flexible resistive strain sensor based on waterborne polyurethane polymer for wearable electronics[J]. Composites Science and Technology, 2022, 221: 109355.
- [5] WANG G, LI M, ZHANG J, et al. Flexible, stable and durable polydopamine@lead zirconate titanate/polyimide composite membranes for piezoelectric pressure sensors and limb motion monitoring[J]. Composites Part C (Open Access), 2022, 8: 100292.
- [6] JI B, ZHOU Q, CHEN G, et al. In situ assembly of a wearable capacitive sensor with a spine-shaped dielectric for shear-pressure monitoring[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2020, 8(44): 15634-15645.
- [7] XIONG Y X, SHEN Y K, TIAN L, et al. A flexible, ultra-highly sensitive and stable capacitive pressure sensor with convex microarrays for motion and health monitoring[J]. Nano Energy, 2020, 70: 104436.
- [8] ZHANG Y Q, LIU S D, MIAO Y H, et al. Highly stretchable and sensitive pressure sensor array based on icicle-shaped liquid metal film electrodes[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(25): 27961-27970.

(下转第 1471 页)

通过实验可以得出:利用倾斜摄像技术可以有效提高遥感图像的分辨率,同时基于改进的BAS算法得到的图像之间的变换矩阵 H 更精确。

5 结 论

本文针对遥感图像缺乏光谱信息而导致图像失真度高、成像模糊的问题,提出了一种基于倾斜摄影图像和遥感图像配准融合的方法。利用航空倾斜摄影测量技术,采用基于特征点匹配的方式建立模型,基于改进的天牛须算法进行函数优化,实现了新的增强遥感图像数据分辨率的方法,有助于对三维空间中的目标进行更加完整、清晰的描述,构建更直观、更真实的三维目标。

[参 考 文 献]

- [1] 王百勇,张艳华. 基于尺度空间理论的舰船遥感图像特征提取技术[J]. 舰船科学技术,2021,43(18):184-186.
- [2] 石聪聪,杨学志,董张玉,等. 一种改进 SIFT 的 SAR 与可见光图像配准算法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(2):182-187.
- [3] 余先川,吕中华,胡丹. 遥感图像配准技术综述[J]. 光学精密工程,2013,21(11):2960-2972.
- [4] 赵卫东,刘俊德,王慢慢,等. 基于改进 AKAZE 算法的快速图像配准方法[J]. 激光与光电子学展,2023,60(6):90-96.
- [5] 杨家俊,丁祝顺,陈昕. 图像配准关键技术综述[J]. 导航与控制,2020,19(1):77-84.
- [6] 宋博,姜万里,孙涛,等. 快速特征提取与感知哈希结合的图像配准算法[J]. 计算机工程与应用,2018,54(7):206-212.
- [7] 杨国东,王民水. 倾斜摄影测量技术应用及展望[J]. 测绘与空间地理信息,2016,39(1):13-15,18.
- [8] 张东,余朝刚. 基于特征点的图像拼接方法[J]. 计算机系统应用,2016,25(3):107-112.
- [9] 贡超,蒋建国,齐美彬. 基于扩散距离的 SURF 特征图像匹配算法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2015,38(4):474-478.
- [10] 周怡,马佳义,黄珺. 基于互导滤波和显著性映射的红外可见光图像融合[J]. 遥感技术与应用,2020,35(6):1404-1413.
- [1] 王百勇,张艳华. 基于尺度空间理论的舰船遥感图像特征提取技术[J]. 舰船科学技术,2021,43(18):184-186.
- [2] 石聪聪,杨学志,董张玉,等. 一种改进 SIFT 的 SAR 与可见光图像配准算法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(2):182-187.
- [3] 余先川,吕中华,胡丹. 遥感图像配准技术综述[J]. 光学精密工程,2013,21(11):2960-2972.
- [4] 赵卫东,刘俊德,王慢慢,等. 基于改进 AKAZE 算法的快速图像配准方法[J]. 激光与光电子学展,2023,60(6):90-96.
- [5] 杨家俊,丁祝顺,陈昕. 图像配准关键技术综述[J]. 导航与控制,2020,19(1):77-84.
- [6] 宋博,姜万里,孙涛,等. 快速特征提取与感知哈希结合的图像配准算法[J]. 计算机工程与应用,2018,54(7):206-212.
- [7] 杨国东,王民水. 倾斜摄影测量技术应用及展望[J]. 测绘与空间地理信息,2016,39(1):13-15,18.
- [8] 张东,余朝刚. 基于特征点的图像拼接方法[J]. 计算机系统应用,2016,25(3):107-112.
- [9] 贡超,蒋建国,齐美彬. 基于扩散距离的 SURF 特征图像匹配算法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2015,38(4):474-478.
- [10] 周怡,马佳义,黄珺. 基于互导滤波和显著性映射的红外可见光图像融合[J]. 遥感技术与应用,2020,35(6):1404-1413.

(责任编辑 张 镭)

(上接第 1452 页)

- [9] ZHAO S F, RAN W H, WANG D P, et al. 3D Dielectric layer enabled highly sensitive capacitive pressure sensors for wearable electronics[J]. ACS Applied Materials & Interfaces,2020,12(28):32023-32030.
- [10] RUTH S, BAO Z. Designing tunable capacitive pressure sensors based on material properties and microstructure geometry[J]. ACS Applied Materials & Interfaces,2020,12(52):58301-58316.
- [11] GUO Y J, GAO S, YUE W J, et al. Anodized aluminum oxide-assisted low-cost flexible capacitive pressure sensors based on double-sided nanopillars by a facile fabrication method[J]. ACS Applied Materials & Interfaces,2019,11(51):48594-48603.
- [12] LUO Z B, CHEN J, ZHU Z F, et al. High-resolution and high-sensitivity flexible capacitive pressure sensors enhanced by a transferable electrode array and a micropillar-pvdf film[J]. ACS Applied Materials & Interfaces,2021,13(6):7635-7649.
- [13] SHARMA S, CHHETRY A, SHARIFUZZAMAN M, et al. Wearable capacitive pressure sensor based on mxene composite nanofibrous scaffolds for reliable human physiological signal acquisition[J]. ACS Applied Materials & Interfaces,2020,12(19):22212-22224.
- [14] QIU J, GUO X H, CHU R, et al. Rapid-response, low detection limit, and high-sensitivity capacitive flexible tactile sensor based on three-dimensional porous dielectric layer for wearable electronic skin[J]. ACS Applied Materials & Interfaces,2019,11(43):40716-40725.
- [15] CHOI J, KWON D, KIM K, et al. Synergetic effect of porous elastomer and percolation of carbon nanotube filler toward high performance capacitive pressure sensors[J]. ACS Applied Materials & Interfaces,2020,12(1):1698-1706.
- [16] SAKANAS A, GRIGALAITIS R, IVANOV M, et al. The alternative expression of lichteneker's logarithmic mixture formula and its application to the broadband dielectric spectroscopy of BaTiO₃-Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄ composites[J]. Ferroelectrics,2015,479:90-97.
- [17] 刘彩霞,卢柏声,李帅,等. 基于纳米银颗粒聚多巴胺碳纳米管导电材料的三明治型柔性应变传感器[J]. 复合材料学报,2022,39(12):5835-5845.
- [18] LEE J, PYO S, KWON D, et al. Ultrasensitive strain sensor based on separation of overlapped carbon nanotubes[J]. Small,2019,15(12):1805120.
- [19] JIA J, HUANG G T, DENG J P, et al. Skin-inspired flexible and high-sensitivity pressure sensors based on RGO films with continuous-gradient wrinkles[J]. Nanoscale,2018,11(10):4258-4266.

(责任编辑 胡亚敏)