

基于十字结构 Fe NWs/Graphene/Interlock 的精确多向感知和宽应变范围多向柔性应变传感器

崔旭¹, 杨平安²

(1. 重庆邮电大学自动化学院 重庆 400065;

2. 重庆邮电大学自动化学院 重庆 400065)

Email: s210332001@stu.cqupt.edu.cn; yangpa@cqupt.edu.cn

摘要: 多向柔性应变传感器在医疗、运动、机器人和虚拟现实等领域至关重要。但当前存在的问题是难以在精确实现多向检测的同时具备优异的传感性能。本文利用 Fe NWs、Graphene 和双罗纹针织物 (GR@Fe NWs IKF) 成功制备了敏感层, 基于 GR@Fe NWs IKF 敏感层制备了十字形结构的多向柔性应变传感器, 得益于正交配置原理设计的十字形结构所特有的多向感知属性使得传感器能够实现多向感知, 对施加力的方向具有明显的表现, 但是对于垂直于施加力的方向几乎没有反应, 在 0-75% 工作范围内表现出优异的单向感知能力, 即拉伸方向的灵敏度为 8.888, 垂直于拉伸方向的灵敏度为 0。该传感器在大应变 75%-100% 范围内具有良好的线性响应 ($R^2=99.0\%$), 并且在高达 80% 应变 (~2000 次循环) 下具有良好的再现性。此外, 通过对人体复杂的多自由度颈部、手腕运动和施加不同角度应力进行检测, 实现多向运动监测, 在运动监测、人机交互等领域中展示了广阔的应用前景。

关键词: 多向柔性应变传感器; 十字形结构; 多向感知

1、研究背景

近年来, 柔性应变传感器受到了极大的关注, 这种传感器可以将机械变形转化为可测量的电信号。其在人体运动检测、软机器人、个人健康监测、人机交互等多个领域的潜在应用得到了充分开发。根据工作机理, 柔性应变传感器有几种类型, 包括电阻式、电容式、压电式和摩擦电式传感器。电阻式应变传感器由于重量小、结构简单、响应速度快等特点, 在可穿戴式传感设备中显示出更大的潜力。在大多数情况下, 多角度运动的检测对于应变传感器来说是必不可少的, 特别是在一些特定的领域, 如运动监测、行为识别等。然而, 尽管在可穿戴应变传感器传感性能提升方面取得了很大进展, 但这些应变传感器只能检测预设方向上的应变, 无法对多角度运动进行区分检测。具有多方运动检测能力的困难是由于主应变方向和横向电阻的强耦合变化。因此, 一旦发生离轴应变, 将影响应变传感器的电信号, 导致应变输出失真。

2、研究内容

本研究选用双罗纹结构针织物作为基材、Fe NWs 和 Graphene 作为导电填料, 制备基于 Fe

NWs、Graphene 和双罗纹结构针织物的敏感层，再以 PDMS 为衬底，基于正交配置原理，设计构筑了十字形结构的 Fe NWs/Graphene/ Interlock 多向柔性应变传感器。基于 interlock 的特殊结构和导电填料的协同作用，敏感层形成“砖泥”结构，使得传感器具有优异的传感性能，在 75%-100% 范围内具有良好的线性响应，并且在高达 80% 应变 (~2000 次循环) 下具有良好的再现性。十字形结构所特有的多向感知属性使得传感器能够实现多向感知，当沿着拉伸方向施加应力时，传感器仅对平行于拉伸方向的应变敏感，对垂直于拉伸方向的应变不敏感。通过测试可知，该传感器在大应变范围内具有优异的单向感知性能、高线性度和稳定性等特点。

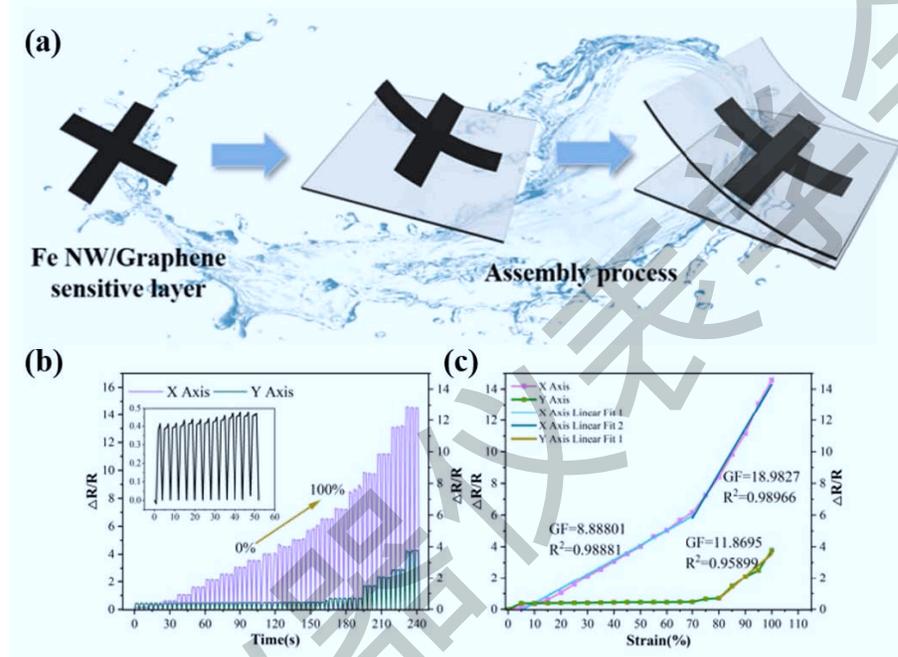


Fig. 1. (a) Cross-shaped sensor structure diagram, (b) Response curve under different strains of Fe NWs/ Graphene multi-directional flexible strain sensors, (c) Linearity and sensitivity.

基于双罗纹针织结构的 FeNWs/Graphene 多方向柔性应变传感器表现出优异的多向传感性能，特别适用于人体运动监测。通过将传感器贴附于颈部和手腕，能精确监测头部和手腕的运动状态，如头部在水平

方向的摆动主要表现为 X 轴的明显响应，手腕平面内运动时，X 轴和 Y 轴均有响应，主要在 X 轴方向。此外，通过在拉伸测试平台上施加不同角度的应力，传感器显示出能够精确测量多角度的能力。因此，这种传感器在智能机器人和可穿戴智能设备的人体运动监测领域具有广泛应用前景。

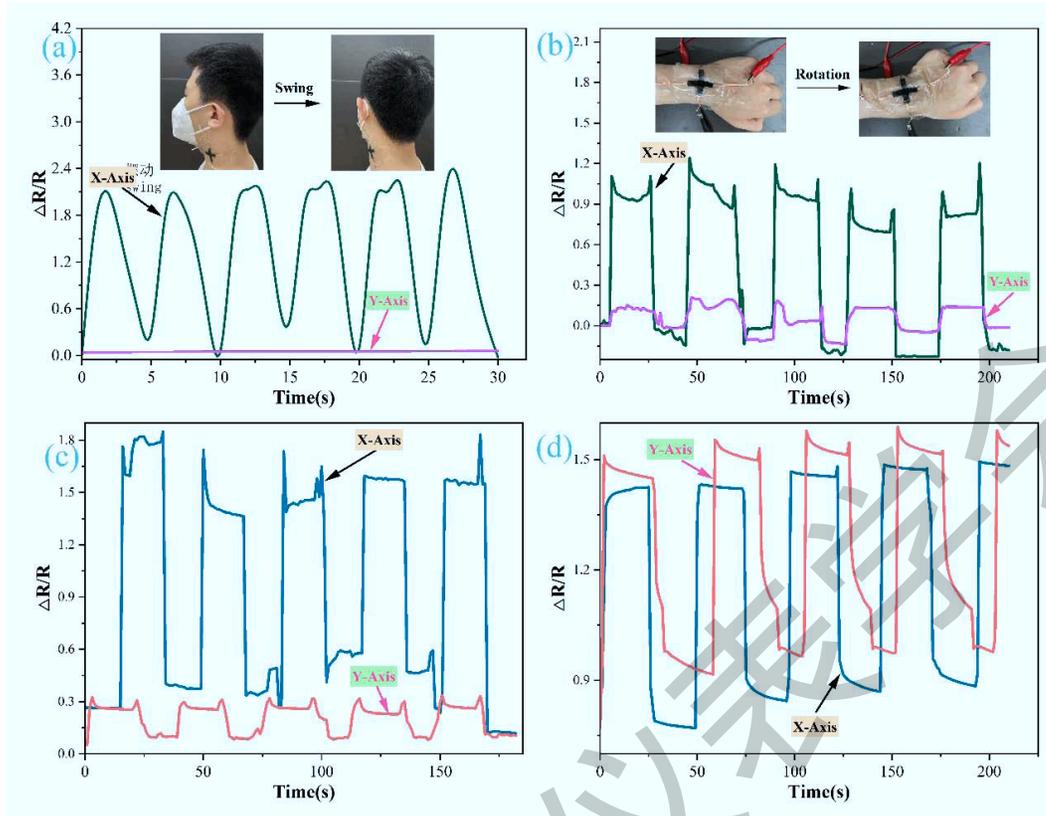


Fig. 2. Multidirectional monitoring at 10% strain of (a) wiggle motion, (b) Wrist joint motion, (c) Multidirectional Angle of 30°, (d) Multidirectional Angle of 45°.

3、结论

本文成功地开发了一种基于十字结构 Fe NWs/Graphene/Interlock 的多向柔性应变传感器。利用 Graphene 完成对 Fe NWs 的物理包覆，在针织物上采用浸渍加喷涂的方式来实现传感器的构筑。研究发现，得益于导电填料的优异特性和双罗纹针织物特有的三维结构，使得该传感器具有多向感知的性能，当沿着拉伸方向施加应力时，传感器仅对平行于拉伸方向的应变敏感，在 0-75% 工作范围内拉伸方向的灵敏度为 8.888，垂直于拉伸方向的灵敏度为 0。得益于敏感层的特殊材料，该传感器大应变 75%-100% 范围内具有良好的线性响应 ($R^2 = 99.0\%$)，并且在高达 80% 应变 (~2000 次循环) 下具有良好的再现性。基于所制多向传感器的优良传感性能与多方向力监测功能，我们展示了其在检测人体运动 (包括颈部和手腕运动) 以及不同角度应力感知的实际应用，显示了其作为智能机器人和健康监测的可穿戴电子设备的潜力，但是弱应变和多峰传感器还需要进一步研究。

参考文献

- [1] D. Shin, J. Lee, T. Kim, and H. Seok, "Flexible and Stretchable Optical Fiber Strain Sensor based on Nanoparticles and Polymer for Human Motion Detection," in 2022 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA), Jun. 2022, pp. 1–5.
- [2] Q. Zou, Y. Wang, and F. Yang, "An intrinsically embedded pressure-temperature dual-mode soft sensor towards soft robotics," *Sensors and Actuators A: Physical.*, vol. 332, p. 113084, Dec. 2021.
- [3] B. Peng, F. Zhao, J. Ping, and Y. Ying, "Recent Advances in Nanomaterial-Enabled Wearable Sensors: Material Synthesis, Sensor Design, and Personal Health Monitoring," *Small*, vol. 16, no. 44, p. 2002681, Nov. 2020.
- [4] S. Raman and A. R. Sankar, "Intrinsically conducting polymers in flexible and stretchable resistive strain sensors: a review," *Journal of Materials Science.*, vol. 57, no. 28, pp. 13152–13178, Jul. 2022.
- [5] A. Qiu et al., "Highly sensitive and flexible capacitive elastomeric sensors for compressive strain measurements," *Materials Today Communications.*, vol. 26, p. 102023, Mar. 2021.
- [6] K. Kim, G. Song, C. Park, and K.-S. Yun, "Multifunctional Woven Structure Operating as Triboelectric Energy Harvester, Capacitive Tactile Sensor Array, and Piezoresistive Strain Sensor Array," *Sensors*, vol. 17, no. 11, p. 2582, Nov. 2017.
- [7] T. Dong, Y. Gu, T. Liu, and M. Pecht, "Resistive and capacitive strain sensors based on customized compliant electrode: Comparison and their wearable applications," *Sensors and Actuators A: Physical.*, vol. 326, p. 112720, Aug. 2021.
- [8] H. Zhang et al., "Anisotropic, Wrinkled, and Crack-Bridging Structure for Ultrasensitive, Highly Selective Multidirectional Strain Sensors," *Nano-Micro Lett.*, vol. 13, no. 1, p. 122, Dec. 2021. ARGALL B D, CHERNOVA S, VELOSO M, et al. A survey of robot learning from demonstration[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2009, 57(5): 469-483.