



基于柔性太阳能电池和超薄水凝胶薄膜的手势识别

吴如成^{1,2}, 丁文伯³, 徐晓敏³, 宋林琦^{1,2}, 徐伟涛^{1,2}

(1. 香港城市大学深圳研究院, 广东 深圳 518057; 2. 香港城市大学计算机学院, 香港 999077;
3. 清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518071)

摘要: 人们在日常生活中会用到各种各样的手势, 如何将不同的手势与现有的智能可穿戴设备等结合起来对生活质量的提升有不可或缺的作用, 利用太阳能相关设备的光电转换特性可以很好地解决手势识别和设备能耗问题。在柔性太阳能电池与手势识别结合的研究中, 采集了 5 种常用手势数据, 进行了 Z-Score、低通滤波、滑动窗口等信号处理方法, 并利用随机森林、支持向量机和神经网络等对其进行分类, 成功地在小样本的基础上实现了 100% 的预测精度, 可以证明该方法在手势识别的应用中有显著优势。

关键词: 柔性太阳能电池; 超薄水凝胶薄膜; 手势识别; 机器学习; 智能可穿戴设备

中图分类号: TP391

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023143

Gesture recognition based on flexible solar cells and ultrathin hydrogel film

WU Rucheng^{1,2}, DING Wenbo³, XU Xiaomin³, SONG Linqi^{1,2}, XU Weitao^{1,2}

1. Shenzhen Research Institute, City University of Hong Kong, Shenzhen 518057, China

2. Department of Computer Science, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China

3. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518071, China

Abstract: Daily life involves various gestures, and combining these with smart wearable devices is crucial for improving quality of life. One effective solution to the challenges of gesture recognition and device energy consumption is utilizing the photoelectric conversion characteristics of solar energy-related devices. The data of five commonly used gestures were collected in the research of the combination of flexible solar cells and gesture recognition. Z-Score, low-pass filter, sliding window techniques for signal processing were applied, and successfully achieved 100% predicted accuracy using random forest, support vector machine and neural network algorithms even with small samples which showed that this method had significant advantages in the application of gesture recognition.

Key words: flexible solar cells, ultrathin hydrogel film, gesture recognition, machine learning, smart wearable device

收稿日期: 2023-04-14; 修回日期: 2023-07-05

通信作者: 徐伟涛, weitaoxu@cityu.edu.hk

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62101471); 香港城市大学深圳研究院和中国香港特别行政区研究资助局资助项目 (No.CityU21201420, No.CityU11201422)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62101471), The Shenzhen Research Institute, City University of Hong Kong, and the Research Grants Council of the Hong Kong Special Administrative Region, China (No.CityU21201420, No.CityU11201422)



0 引言

随着互联网和 5G 的普及,万物互联的时代浪潮正在向我们席卷而来。智能家居和智能可穿戴设备给我们的生活带来诸多便捷的同时正在默默地改变着我们的生活方式,同时人们正在尝试各种各样新型的人机交互方式,使得我们身边的设备在具备便携性的同时更加智能化^[1-2]。在智能手环、腕带以及项链发展的带动下,姿势识别与智能可穿戴设备结合正在成为一种重要的发展趋势,其中手势姿势的识别以其更自然、更便捷和操作简单受到研究者和工程师的青睐。因此,基于可穿戴设备进行姿势识别具有更加深远的意义^[1]。

目前,研究人员通过寻求各种各样的仪器和设备作为媒介实现姿势识别分类,常见的有手套、鞋子、无线设备以及各种传感器^[3-5]。但这在实际的应用中也存在诸多问题,例如,大多数设备都需要充电和外加传感器达到目标效果。因此为了平衡各种需求,机器识别和计算机视觉这两种方法以其实现的高精度和操纵的便捷性被广泛应用在姿势识别领域,它们的主要过程是对收集到的姿势图片进行特征提取,然后利用神经网络对其进行分类以得到正确的预测结果,改变模型的参数和结构,使其适用于不同的场景和应用^[6]。

然而,以上所提及的方法或者大多数设备都需要电池的供电和大量的计算资源,对于简单的姿势识别并不能实现其应有的应用价值。因此寻找一种轻便且不需要额外供电的传感器设备将为我们解决简单的手势识别提供很好的应用场景。太阳能电池作为一种将光信号转换为电信号的有效器件不仅能接收各种光线,还能解决供电问题^[7],为姿势识别提供了很好的媒介。除此之外,基于太阳能电池的姿势识别技术还可以应用于虚拟现实和增强现实等领域^[8],用户通过利用

太阳能电池供电的手势识别设备,可以更加自然地与虚拟场景进行交互,从而提高用户体验和沉浸感。这里使用一种新型的柔性太阳能电池器件作为传感器并通过超薄水凝胶薄膜使其与人体皮肤直接接触,新型水凝胶薄膜因其超薄的特性和超好的贴附性能很好地解决日常的佩戴问题,柔性太阳能电池器件以其柔性和便携性也很好适应了人体各个位置的贴附性,图 1 描述了这一新型传感器的具体组合结构并展示了其应用场景^[9]。



图 1 超薄水凝胶薄膜和柔性太阳能电池的应用^[9]

1 姿势识别研究进展

姿势识别过程就是在一个用户做出姿势的同时接收器识别姿势的过程^[10],因此各种各样的接收器被探索出来以发展姿势识别技术,如基于电磁场效应的 Wi-Fi 信号、利用加速度和角速度的传感器信号、利用声波信号的麦克风,以及上述提到的利用视频和相机的计算机视觉技术^[11-15]。虽然这些方法已经可以实现超过 98% 的精度,而且类似于 Wi-Fi 和声波的信号更是无处不在,但它们都需要消耗额外的资源才能实现相应的目标。Varshney 等^[16]基于太阳能电池姿势识别的工作给姿势识别的发展与太阳能电池的结合带来了新的发展,同时也有基于透明太阳能电池的姿势识别,为这个方向提供了新的思路和方法^[17],但

这些基于太阳能电池的姿势识别同样受限于额外的可穿戴设备与其结合。而且这些太阳能器件的外形并不能很好地贴合皮肤等需要形变的应用场景,这也极大地限制了基于太阳能电池姿势识别的发展。

为了解决上述问题,本文采用新型的太阳能电池作为原始设备并结合全新的超薄水凝胶薄膜使其与皮肤更好地贴合,在数据收集过程中,利用太阳能将光能转换为电信号的原理对其进行不同的手势输入,实验发现,不同的手势输入对于光线的遮挡有不同的效果,从而产生不同的电信号,进而区分不同的手势姿势。之后对采集到的信号通过滤波、归一化、滑动切割等处理方式得到训练数据^[18],进而使用多种机器学习模型,如常见的朴素贝叶斯(naive Bayes, NB)、支持向量机(support vector machine, SVM)^[19]、随机森林(random forest, RF)^[20]、逻辑回归(logistic regression, LR)^[21]和 K -近邻(k -nearest neighbor, KNN)^[22],以及常用的深度学习模型,如卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)^[23]、长短期记忆(long short-term memory, LSTM)^[24]和视觉几何组(visual geometry group, VGG)^[25],并对不同的模型进行优化使其更加适合姿势识别任务。

2 手势识别实现过程

2.1 实现器件

2.1.1 柔性有机太阳能电池

柔性太阳能电池是一种采用柔性基底材料制作的太阳能电池,其具有轻薄、柔软、可弯曲、易于集成等优点,可以适应各种复杂形状的曲面进行能量转换^[26]。相比于传统的硅基太阳能电池,柔性太阳能电池具有更好的适应性和可扩展性,可以应用于多种领域,如智能穿戴设备、无人机、太空探索等。柔性太阳能电池的基底材料多种多样,包括聚合物、金属箔、纤维素等,其中以聚合物基底材料最为常见,本文使用的柔性有机光伏器件以聚对二

甲苯(parylene)为柔性衬底,并在其上沉积了氧化铟锡透明电极、电子传输层和活性层,再在上面热蒸发了氧化钼(MoO_x)作为空穴传输层和银电极作为阳极。使用 PM6:Y6 混合物作为活性层,在气氛控制条件下制备而得。并在 25℃和 55%湿度条件下表现出不错的稳定性和光电转化效能^[9]。

2.1.2 超薄水凝胶薄膜

如何将柔性有机太阳能电池有效地与人体皮肤结合也是智能可穿戴设备发展重要的一步,本文使用最新的超薄水凝胶薄膜使柔性太阳能电池和皮肤能够有效接触。使用超薄水凝胶薄膜作为皮肤—电子界面有如下优点:首先,它具有低过敏性和生物相容性,使其成为用于人体皮肤的安全选择;其次,它具有高度顺应性,可用于各种皮肤部位,包括前臂、手和脸颊;最后,它允许在皮肤—水凝胶界面进行自由水交换和高水蒸汽渗透性,从而提高透气性和皮肤—集成电子产品的普遍适用性。

除此之外,超薄水凝胶薄膜通过温和的剥离力和皮肤—水凝胶界面处的自由水交换粘附在皮肤上,这允许薄膜设备在皮肤上长期粘附超过一周而不会限制皮肤的自然运动或引起刺激。这些薄膜还具有高度顺应性,这意味着它们可以贴合皮肤的形状并随之移动而不会引起不适,因此在可穿戴设备、智能家居、医疗监测等领域有广泛的应用。水凝胶夹层与超柔性光电池器件的集成过程主要包括:通过冷层压法制备超薄水凝胶薄膜,并从聚对苯二甲酸乙二酯(polyethylene terephthalate, PET)保护膜上剥离之前切割所需尺寸;柔性太阳能电池通过氧气等离子体处理 60 s,最小功率为 10 W,然后将设备从支撑玻璃基板上轻轻剥离并附着到超薄水凝胶膜上。去除背面的 PET 保护膜,将可穿戴贴片贴在所需的皮肤位置即可完成^[9]。

2.2 实现概述

基于太阳能电池对光电信号的转换原理,利用新型的柔性有机太阳能电池和超薄水凝胶



薄膜成功实现了对简易手势的识别和分类。主要分类手势包括一些生活中常用且简易的手势：上下连续手势、左右连续手势、手掌反转手势、从右到左手势以及从左到右的手势。实验观察发现，不同的光照强度会对手势信号有较大的影响，不仅如此，不同的采样频率也会对后期的数据处理产生不同的效果，在收集数据的同时在一定范围内改变每次手势的起始位置和手势的移动速度，进而确保实验结果更具有普适性，从而提高其在实际应用中的鲁棒性。同时，不同的分类方法在手势识别的精度上也会产生不同的效果，本实验主要采用机器学习和深度学习的方法进行分类。

2.3 实现流程

手势识别实验框架如图 2 所示，当用户实行不同的手势时，柔性太阳能设备会捕获其产生的不同的光电流时间序列，并使用低功耗蓝牙 (bluetooth low energy, BLE) 等低功率通信将其传输到边缘设备上的手势识别系统中。这个手势识别系统可以位于智能手机、笔记本计算机或家庭集线器等设备上。如果涉及设备中的本地控制，手势识别系统会将手势信息发送回原始设备，或者根据所需动作与其他物联网设备通信。为了确保高准确性，本文提出了一种基于机器学习的手势识别框架，该框架使用不同光电流时间序列中的特征进行训练分类器。在分类之前，采用信号处理管道处理可能导致高分类错误的问题。下面介绍手势识别框架的信号处理和分类细节。

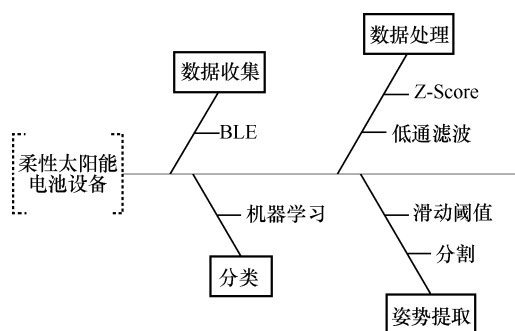


图 2 手势识别实验框架

2.3.1 信号处理

信号处理部分主要使用 4 种方法对原始信号进行处理。首先，在 9 000 lx 的光照条件下进行实验并在 100 Hz 的采样频率下进行数据收集，然后使用 Z-Score 的方法处理原始数据使其达到均值为 0、标准差为 1 的效果，从而在保证原始数据分布的情况下减少运算量和降低后续处理的复杂度。其次，原始数据傅里叶变换分析如图 3 所示，基于傅里叶变换分析得到原始信号的频率主要分布在 5 Hz 以下，而噪声频率主要在 5 Hz 以上，因此，首先使用低通滤波器对原始信号进行低通滤波。滤波之后发现，对于上下连续、左右连续和手掌反转的手势仍能保持数据的原始特征，但对于从左到右或从右到左的手势并不能很好地保留数据特征，因此，对于从左到右或从右到左的手势，仅使用 Z-Score 的处理方式。之后通过滑动差分阈值的方法对初步处理得到的数据进行分割点的确认，通过滑动阈值的处理方法实现其分割点的确认精度达到 99% 以上。最后基于以上所得起始点根据数据特征对数据进行不同长度的分割：左右连续的姿势的分割长度设为 40，其他手势的分割长度都设为 25，从而得到完整的手势数据，为进一步的分类做准备。

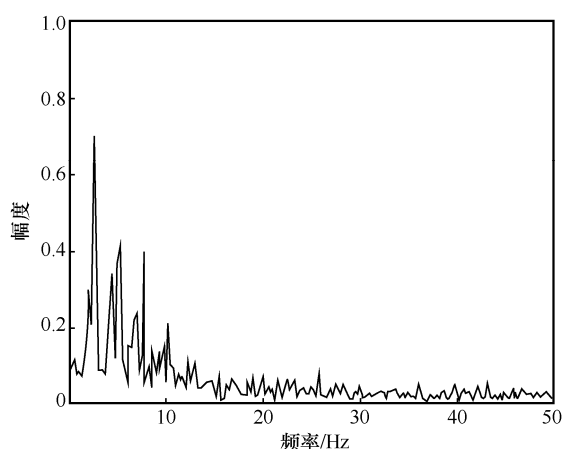


图 3 原始数据傅里叶变换分析

2.3.2 姿势分类

信号处理通过分割得到了每一个单独的姿势，但由于得到的数据长度并不一样，所以首先

使用填充的操作使每一个数据的长度都为 40，以确保每一个数据的特征维度都是 40×1 ，为机器学习的输入做准备。数据处理得到的上下连续手势、左右连续手势、手掌反转手势、从右到左手势以及从左到右手势的数据量分别为 88、81、74、73 和 70。首先，对手势进行标签处理以便于后续的分类，上下连续手势、左右连续手势、手掌反转手势、从右到左手势以及从左到右手势分配的标签分别为 0、1、2、3 和 4。之后，使用不同的机器学习模型对其进行分类，主要包括 NB、LR、KNN、SVM 以及 RF。为了评估每个模型的表现，本文分别计算了模型的准确率 (accuracy)、精确率 (precision)、召回率 (recall)、F1 值 (F1 score) 和混淆矩阵。基于机器学习模型分类结果评估如图 4 所示，可以看到，随机森林在该任务的分类结果中具有最好的表现，可以达到 100% 的预测结果，其次是支持向量机，在该任务的分类结果中也达到了 97% 以上的预测结果。基于以上两个模型的表现，还计算了 SVM 和 RF 的混淆矩阵，如图 5 所示，通过混淆矩阵的对比可以更加直观地看出，随机森林的分类结果比支持向量机在该任务的分类结果更好。除此之外，表现较好的是 KNN 和 LR，而 NB 在该任务分类结果的表现中都低于 80%。

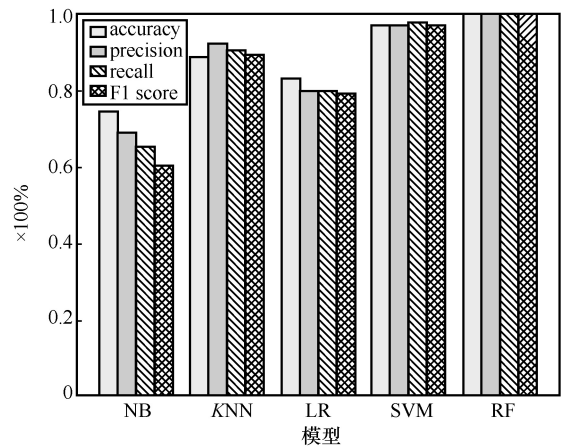


图4 基于机器学习模型分类结果评估

基于以上数据，本文还测试了 LSTM、CNN、和 VGG 3 种神经网络在该任务上的表现，从实验结果来看，即使在数据量较小的情况下，CNN 和 VGG 仍然可以达到 97% 以上的精度，然而 LSTM 在该任务的精度仅有 53% 左右，并不适合该任务的分类结果。基于以上结果绘制了 CNN 和 VGG 在训练过程中的损失变化和精度变化，如图 6 所示，在该任务的训练过程中，CNN 表现出了更快的收敛速度，从而减少了所需要的计算时间。综上所述，机器学习和深度学习方法在该小样本的分类任务中都表现出不错的结果，其中随机森林和卷积神经网络在该任务的表现尤为突出。

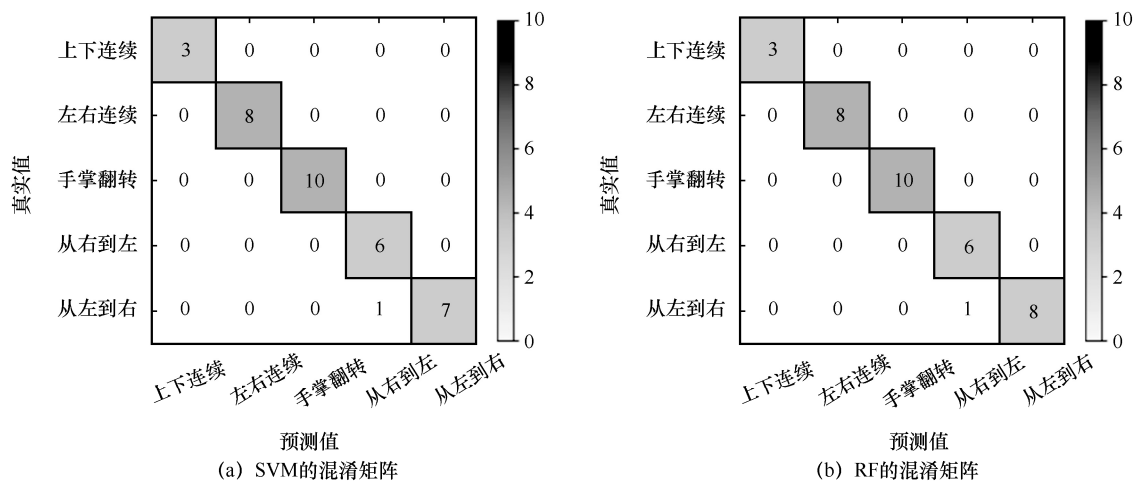


图5 SVM和RF的混淆矩阵

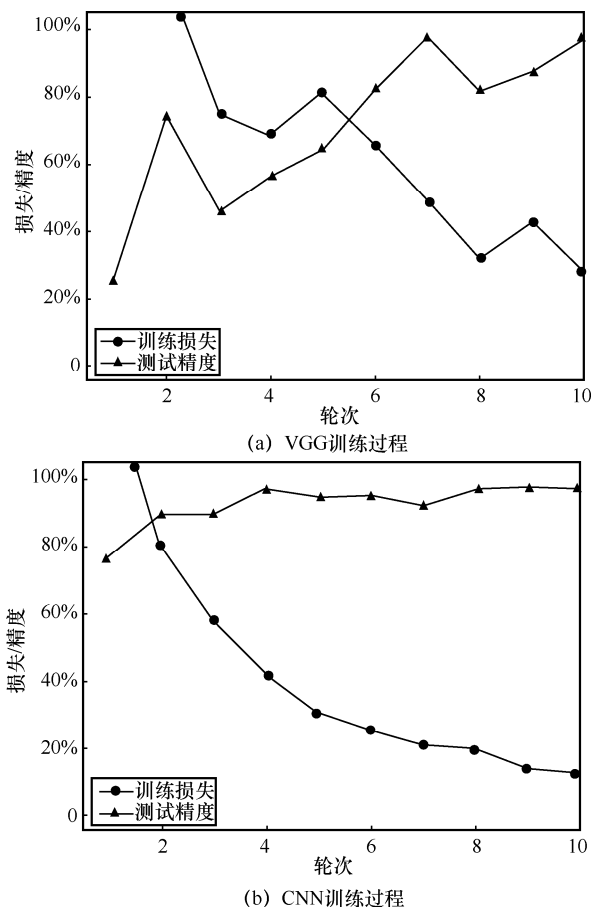


图6 CNN和VGG在训练过程中的损失变化和精度变化

3 结束语

柔性太阳能电池和超薄水凝胶薄膜可以很好地贴合在人体的各个位置, 本文将手势识别与其结合, 成功地实现了5种常用手势的识别, 并在小样本的基础上实现了较好的分类精度。目前柔性太阳能电池和超薄水凝胶薄膜仍处于早期的发展阶段, 还不能很好地作为智能可穿戴设备市场化, 但本文的实验可以为以后柔性太阳能电池和超薄水凝胶薄膜的应用提供一些参考方向, 相信在不久的将来, 会有更多的应用与柔性太阳能电池和超薄水凝胶薄膜相结合为我们的生产生活提供更多的可能。

参考文献:

[1] CHAUDHARY A, RAHEJA J L, DAS K, et al. Intelligent ap-

- proaches to interact with machines using hand gesture recognition in natural way: a survey[J]. International Journal of Computer Science & Engineering Survey, 2011, 2(1): 122-133.
- [2] RUIZ J, LI Y, LANK E. User-defined motion gestures for mobile interaction[C]//Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2011: 197-206.
- [3] STURMAN D J, ZELTZER D. A survey of glove-based input[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1994, 14(1): 30-39.
- [4] PAVLOVIC V I, SHARMA R, HUANG T S. Visual interpretation of hand gestures for human-computer interaction: a review[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(7): 677-695.
- [5] QUEK F K H. Toward a vision-based hand gesture interface[C]//Proceedings of Virtual Reality Software and Technology. WORLD SCIENTIFIC, 1994: 17-31.
- [6] JARVIS R A. A perspective on range finding techniques for computer vision[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1983, PAMI-5(2): 122-139.
- [7] WURFEL P. Physics of solar cells: from basic principles to advanced concepts[M]. John Wiley & Sons, 2016.
- [8] CHIOU R, NGUYEN H, CIOBANESCU H I, et al. Developing VR-based solar cell lab module in green manufacturing education[C]//Proceedings of 2021 ASEE Virtual Annual Conference Content Access Proceedings. ASEE Conferences, 2021.
- [9] CHENG S M, LOU Z R, ZHANG L, et al. Ultrathin hydrogel films toward breathable skin-integrated electronics[J]. Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla), 2023, 35(1): e2206793.
- [10] MITRA S, ACHARYA T. Gesture recognition: a survey[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 2007, 37(3): 311-324.
- [11] ABDELNASSER H, HARRAS K, YOUSSEF M. Wigest: ubiquitous WiFi-based gesture recognition system[C]//Proceedings of Qatar Foundation Annual Research Conference Proceedings Volume 2014 Issue 1. Hamad bin Khalifa University Press (HBKU Press), 2014: ITPP1127.
- [12] Human 3D reconstruction and motion capture using a single flying camera - rare & special e-zone[EB]. 2018.
- [13] JACKO J, SEARS A. Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems[EB]. 2001.
- [14] XU Z, BAI K, ZHU S C. TapLogger: inferring user inputs on smartphone touchscreens using on-board motion sensors[C]//Proceedings of the Fifth ACM Conference on Security and Privacy in Wireless and Mobile Networks. New York: ACM Press, 2012: 113-124.
- [15] LI T X, XIONG X, XIE Y F, et al. Reconstructing hand poses using visible light[J]. Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 2017, 1(3): 1-20.

- [16] VARSHNEY A, SOLEIMAN A, MOTTOLA L, et al. Battery-free visible light sensing[C]//Proceedings of the 4th ACM Workshop on Visible Light Communication Systems. New York: ACM Press, 2017: 3-8.
- [17] MA D, LAN G H, HASSAN M, et al. SolarGest: ubiquitous and battery-free gesture recognition using solar cells[C]//Proceedings of MobiCom'19: The 25th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 2019: 1-15.
- [18] CHEADLE C, VAWTER M P, FREED W J, et al. Analysis of microarray data using Z score transformation[J]. The Journal of Molecular Diagnostics: JMD, 2003, 5(2): 73-81.
- [19] HUANG D Y, HU W C, CHANG S H. Vision-based hand gesture recognition using PCA Gabor filters and SVM[C]//Proceedings of 2009 Fifth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1-4.
- [20] CAMGÖZ N C, KINDIROGLU A A, AKARUN L. Gesture recognition using template based random forest classifiers[C]//European Conference on Computer Vision. Cham: Springer, 2015: 579-594.
- [21] WU Y H, WU Z, FU C L. Continuous arm gesture recognition based on natural features and logistic regression[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(19): 8143-8153.
- [22] LIU Y Q, WANG X H, YAN K. Hand gesture recognition based on concentric circular scan lines and weighted K -nearest neighbor algorithm[J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(1): 209-223.
- [23] CHUNG H Y, CHUNG Y L, TSAI W F. An efficient hand gesture recognition system based on deep CNN[C]//Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Piscataway: IEEE Press, 2019: 853-858.
- [24] ZHU G M, ZHANG L, SHEN P Y, et al. Multimodal gesture recognition using 3-D convolution and convolutional LSTM[J]. IEEE Access, 2017 (5): 4517-4524.
- [25] SENGUPTA A, YE Y T, WANG R, et al. Going deeper in spiking neural networks: VGG and residual architectures[J]. Frontiers in Neuroscience, 2019(13): 95.
- [26] PAGLIARO M, CIRIMINNA R, PALMISANO G. Flexible solarcells[J]. ChemSusChem, 2008, 1(11): 880-891.

[作者简介]



吴如成（1998—），男，香港城市大学计算机学院博士生，香港城市大学深圳研究院博士生，主要研究方向为人工智能、可穿戴设备和物联网等。



丁文伯（1990—），男，博士，清华大学深圳国际研究生院助理教授、博士生导师，主要研究方向为信号处理、机器人、人机界面和机器学习。



徐晓敏（1989—），女，博士，清华大学深圳国际研究生院副教授、博士生导师，主要从事柔性材料和生物电子器件领域工作。



宋林琦（1985—），男，博士，香港城市大学计算机学院助理教授，香港城市大学深圳研究院副研究员，主要研究方向为数据科学、机器学习、推荐系统、信息论和算法。



徐伟涛（1987—），男，博士，香港城市大学计算机学院助理教授，香港城市大学深圳研究院副研究员，主要研究方向为物联网、移动计算、物联网安全、可穿戴设备和低功耗广域网。