

基于生理监控的智能可穿戴服装研究

胡丹, 赵蒙蒙

(上海工程技术大学 纺织服装学院, 上海 201620)

摘要:文章综述国内外智能可穿戴服装在生理监测方面的研究和进展,对实例中所应用的智能可穿戴技术进行总结。详细解释可穿戴2.0智能服装系统的构成及工作原理,并提出其通用架构。对智能服装系统的模块构成进行剖析,对其所搭载的Arduino等关键技术进行阐述。该研究旨在为相关人员在智能可穿戴服装的可持续数据监测开发与生理监测、生活环境辅助、物联网交互等方面的设计提供参考。

关键词:智能可穿戴;生理监测;智能服装系统;可穿戴2.0;Arduino

中图分类号:TS 941.2

文献标志码:B

文章编号:1000-4033(2024)06-0059-06

Research Advances in Smart Wearable Clothing with Physiological Monitoring Function

Hu Dan, Zhao Mengmeng

(School of Textiles and Fashion, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: This paper reviews the latest research and progress of smart wearable clothing with physiological monitoring function at home and abroad, and summarizes the smart wearable technologies applied in the examples. The composition and working principles of the wearable 2.0 smart clothing system are explained in detail, and its generic architecture is proposed. The modular composition of the smart clothing system is dissected, and the key technologies such as Arduino are described. This paper aims to provide references for those involved in the design of sustainable data monitoring development and physiological monitoring of smart wearable clothing, living environment assistance and Internet of things interaction and other aspects.

Key words: Smart Wearable; Physiological Monitoring; Smart Clothing System; Wearable 2.0; Arduino

随着人们对健康生活需求的增加和微机电系统生产技术的进步,智能可穿戴设备如智能腰带^[1]、可穿戴感知手套^[2]、集成传感器的智能服装^[3]正在迅速发展,尤其在个性化医疗、老年人保健、运动健身等领域。

利用智能可穿戴服装可获取人体生理参数的优势,可将其运用到医疗保健系统中,从而减轻医疗系统负担。然而,市面上可穿戴设备的人体工程学设计较差,无法有

效覆盖人体,不能实现不间断、无噪音的数据收集,并且在长期使用情况下无法保证佩戴者舒适。要想摆脱当下智能可穿戴服装持续性数据收集的困境,需要重新思考智能服装系统设计,以更舒适、节能、可持续方式收集数据。在大数据和云服务的发展与支持下,可穿戴2.0将替代传统的可穿戴系统(可穿戴1.0),达成多个设备互联与云端服务功能,实现医疗设备、体育运动、城市智能化等多方面的可穿戴一

体化服务。除在电子信息技术上的发展外,智能可穿戴服装发展趋势应遵循以用户为中心^[4]的设计理念,融合科技使服装智能化,在面料方面采用更易降解的材料,以达到节约资源、保护环境的目的。

本文将可穿戴技术在生理监测方面的运用分为医疗健康监测、弱势群体监测、运动效能监测、特种服装应用4方面,介绍相关方面智能可穿戴服装的国内外研究现状,并对可穿戴2.0智能服装系统

基金项目:国家自然科学基金(51908349)。

作者简介:胡丹(1999—),女,硕士研究生。主要从事智能可穿戴服装方面的研究。

通讯作者:赵蒙蒙(1985—),女,副教授,博士。E-mail:mengmengzhao@126.com。

相关技术进行总结与分析,提出智能服装系统的通用架构,最后讨论现有智能可穿戴服装的优缺点,为相关设计提供参考。

1 智能可穿戴技术的应用范围

可穿戴技术包括可连接到人体上用于监控和提供智能服务的电子设备,通过不同形式的可穿戴设备,如智能手表、健身跟踪器、智能鞋、智能腰带、大脑活动跟踪器等,监测不同的人体参数。国际电工委员会(IEC)将可穿戴技术分为4个类别,包括配件、纺织品或织物、可修补以及可植入可穿戴设备^[5]。

可穿戴技术面向的人群广泛,根据不同人群的需求及工作需要,可分为普通用户和特殊用户。普通用户可通过穿戴智能服装监测自身生理变化来预防疾病、保持健康。针对普通用户,可在智能服装上搭载蓝牙,使智能服装监测数据传输到智能手机中,方便实时监测。特殊用户包括很少使用智能手机以及不经常出门或使用智能手机有困难的人群,如老年人、视力障碍人群、婴幼儿等,因此需要在用户经常移动的区域(如家庭、病房和医院)安装专用通信网关,智能服装通过短无线技术连接到外部网络,适用于室内环境,如低功耗WiFi。可穿戴技术与服装的融合与发展为人类提供了更方便、快捷、安全的生活与工作辅助。

2 智能可穿戴技术的分类

2.1 医疗监测

医疗监测是当前智能可穿戴产品的主要运用领域。通过对患者的生理信息进行监测,向智能终端发送并显示数据来进行患者生理健康情况监测。随着老龄化越来越严重,医疗资源越来越紧张,预防疾病保持健康是未来发展趋势。通过智能可穿戴服装或产品对人体

日常生理数据进行监测,有助于及时发现身体异常,达到预防慢性疾病、提高生活水平的效果。

Rashidi et al^[6]为老年人设计环境辅助生活工具(AAL)系统,它不仅能在智能居家环境辅助下提供养老服务,还能通过药物管理工具和药物提醒等一系列新兴技术和信息化,实现对老年人的健康管理,减少医疗系统压力。AAL技术还可以使用移动应急响应系统、跌倒检测系统和视频监控系统,为老年人提供更多安全保障。其他AAL技术则可以提供日常生活帮助,如监控日常生活活动和发出提醒,以及辅助老年人移动和自动化。AAL工具可用于预防痴呆患者的流浪行为。此外,一些户外散步的预防工具,如KopAL^[7]和OutCare^[8]通过预定路线或记录日常路线偏离情况,提醒看护人帮助迷失方向的老年人。面向老年人的智能手杖能通过GPS定位功能监控老年人位置,并通过求助键按钮发送给监护人,使老年人在迷路时能第一时间得到救助^[9],但仅限于有明确自我意识和认知的老年人使用。在室内漫步的情况下,Lin et al^[10]使用射频识别(RFID)技术检测老年人是否接近危险区域,Crombag et al^[11]建议在有潜在危险的情况下使用虚拟室内围栏。智能可穿戴设备可通过矫正达到认知康复的医疗效果,微软旗下SenseCam^[12]通过一系列图像和传感器数据记录,捕捉佩戴者一天的数字记录,它能帮助佩戴者回忆起之前被遗忘的经历,起到追溯记忆的辅助作用。

智能可穿戴产品可提高视、听、说障碍人群的交流能力。Pan et al^[13]开发微电子机械麦克风和助听器。Iervolino et al^[14]开发一款可手势识别手套。Amit et al^[15]开发用于

自闭症研究中评估精细运动技能的智能手套。可用于皮炎患者进行夜间抓挠和睡眠测量的二进制划痕分类器^[16],可对夜间抓挠情况进行辨别和监测,为皮炎患者的医疗研究提供客观监测数据。基于STM32单片机集成防摔模块的智能监测服装,可通过三轴信号合成加速度的数据判断老年人摔跤情况^[17],通过云服务系统可直接将摔跤情况发送到智能服务终端,供医务人员进行初步诊断。

2.2 运动效能监测

可穿戴健康监测系统在运动效能方面的运用,主要基于三轴加速度传感器、陀螺仪、GPS实现对人体运动状态识别。在此方面,柔性电子技术的应用和传感器性能直接影响可穿戴运动监测效果。

对于普通运动者来说,可穿戴设备的智能监测功能可以客观分析人体运动情况,并且可根据数据调节适合自身的运动方式。这类产品趋于简单便携,具有一定的软件支持、数据交互及云端交互功能,如运动手环、运动手表、计步器等。

可穿戴设备还可以通过GPS、加速度计、陀螺仪等专业设备,读取运动员身体运动轨迹和心率、呼吸频率、体温等生理参数^[18],帮助运动员调整运动方式。飞利浦公司的一款智能运动服,通过监测运动员的血压、脉搏、运动量,帮助运动员取得更好的成绩^[19]。2004年,澳大利亚Catapult公司推出一款GPS-5 Hz的黑色背心可穿戴运动训练监控服装,它集成加速度计、陀螺仪、GPS等多个传感器模块,穿戴安全方便、检测数据丰富,使得运动训练可穿戴智能化^[20]。

2.3 特种服装运用

特殊作业环境使工作者需要针对性的功能服装来保护其健康

安全。可穿戴智能服装能在从业者的特殊工作状态下,借助传感器、GPS等模块,通过无线传输将数据发送到智能终端设备,方便实时观察及分析作业者的生理健康情况。

Blecha et al^[21]设计一款智能消防防护服,其中的指挥控制单元能够同时监测12名消防员的生理信号、服装内外侧温度、湿度及有毒有害气体,这款智能消防服还配备GPS等模块,可用于通信和定位,如图1所示^[21]。

可穿戴技术在军事领域的应用研究主要面向人体功能状态监测、肢体物理辅助、远程监测与治疗、模拟技术培训等^[22]。美国陆军环境医学研究所研制武士生理状态监测系统^[23],通过无线传感器群将士兵的心率、行走、代谢能量损失、体温等数据,上传到单兵数字化作战系统或指挥通信网络,实现可穿戴服装与智能环境辅助系统的物联网交互。用于提升单兵作战和携带能力的可穿戴外骨骼^[24],可增强人体机能、分担人体肌肉骨骼压力、环境感知等,使士兵在户外拥有更好的环境应变能力。

2.4 弱势群体监护

随着物联网、人工智能、大数据等技术的兴起以及消费者观念的转变,智能服装在婴幼儿消费市场所占比例逐渐增大,面向婴幼儿的智能可穿戴服装是未来服装行业重要的市场方向。

目前,国内市场有许多面向婴幼儿健康监测的可穿戴产品,例如:可穿戴式婴幼儿测温仪、可穿戴式儿童物理退热仪、婴幼儿智能连体衣、智能袜子等。这些产品可对婴幼儿进行简单的体温监测,但因为缺乏功能性照顾模块,尚未达到理想实际生活所需功能。Jakubas et al^[25]设计一款能够监测婴幼儿生

命机能的Textronic系统即Baby-Tex,该系统可对婴幼儿的呼吸节律、水分、体温和运动活动进行远程监测,其中监测温度、湿度和呼吸节律的传感器以针织物的形式集成到服装上,将所测得婴幼儿的生理数据通过蓝牙传输到智能手机。刘青等^[26]设计一款智能儿童防走失外套,服装背部搭载基于Arduino平台的单片机系统,集合GPS、蓝牙技术,使家长手机可智能监测儿童的实时位置,达到防走失目的,该设计兼具功能性、美观性和舒适性,满足市场需求。唐茜等^[27]设计一款婴幼儿可穿戴智能监测服,它采用Arduino作为原型开发平台进行设计,采用非接触式测量对婴幼儿的体温、湿度进行传感监测,并采用差值补偿法使传感器所测温湿度数据符合实际检测数据情况,当监测到婴幼儿生理数据异常时,通过交互平台对监护人进行

警报提醒,能够实时监测婴幼儿生理信息,如图2所示^[25]。

表1是可穿戴技术在服装中的运用实例,展示了在医疗健康、运动效能、特种群体、弱势群体4方面所体现的不同功能,以及所需功能所使用的模块。可知大部分智能服装使用心率、温度等监测基本生理特征的传感器,根据受用人群决定是否添加无线通信、GPS、跌倒报警等针对性的功能模块。而对于智能服装系统与平台,则是根据智能服装需求,选择满足功能且系统处理流畅的单片机作为核心支持。

3 智能服装系统

智能服装是将可穿戴技术嵌入纤维、纱线、织物或服装而构成的。随着智能手机和移动数据传输的出现,智能服装成为连接现实生活与数字世界的一个重要桥梁,通过柔性电子纺织品可使衣服与人体直接接触^[31]。与其他可穿戴设备



图1 智能消防服和消防员智能手套

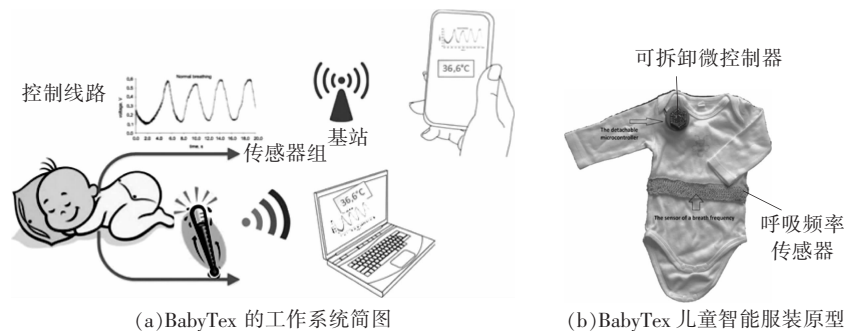


图2 BabyTex系统及儿童可穿戴智能监测服

相比,智能服装的穿着更加自然、监控范围更广。智能服装是新一代服装,具有跟踪个人生物特征、响应环境变化等潜在功能。

3.1 智能服装系统的构成

可穿戴健康监测系统在运动效能监测方面的运用,主要基于三轴智能服装上集成的可穿戴 2.0 系统,将多个连接设备与云服务结合在一起,解决传统可穿戴系统舒适性不强、数据收集不足的问题,给用户的生活方式提供功能更强大、更便捷的选择^[32]。

可穿戴 2.0 医疗系统包括前端系统、通信系统和云服务系统^[32]。前端系统包含各种传感器,负责长期收集健康数据源;此外,还提供用户界面,用户界面的实现有很多形式,可通过手机、移动机器人为用户提供个性化医疗服务,在仿人机器人的支持下还可以实现实时情感人机交互。智能服装的无线通信系统对于实现人类云集成至关重要。智能手机作为个人网关,将智能服装系统测得的数据上传到云服务系统,可以让用户在手机程序上通过可视化数据了解自身健康状况。对于老年人、儿童等特殊用户,则可以将低功耗 WiFi 作为智能服装与云服务系统的连接方式。后端支持云是整个系统的主干,为医疗应用提供智能服务。来自下层的健康数据存储在手机本地云(如 Ad Hoc Cloudlet、Edge Cloud 和网络边缘的移动云)中,用于进一步生理数据分析融合^[33]。上层应用程序可获得计算资源支持。为提供基于实时医疗数据集的弹性服务,可用的硬件设备、软件定义的网络,可通过单独个性化数据收集、数据分析和行动反馈,实现灵活的网络控制^[34]。云服务系统还为用户终端和第三方医疗机构的应用程

序提供支持。总之,智能服装软件是数据采集的基础,移动应用是人类云集成的桥梁,云服务系统是各种医疗服务和认知应用的中心。

智能电子服装系统(SeCSs)^[35]由可穿戴 2.0 概念与整合到纺织品中的传感器相结合形成,可实现健康监测、运动表现、日常运动、社交活动促进的作用。它包括 8 个子工作系统:控制子系统、传感子系统、执行器子系统、通信子系统、定位子系统、电源子系统、储存子系统、显示子系统,以及两个支持子系统:互连子系统和软件子系统。

可穿戴 2.0 版本智能服装系统的结构展示如图 3 所示。可以看出,智能服装系统的通用架构包括 SeCSs 的 8 个子工作系统,通过控制系统连接其他子系统作为功能模块,使智能服装具备人们想要的功能。同时智能服装系统也满足可穿戴服装 2.0 系统的要求,通过前端系统、通信系统和云服务系统,实现用户与医疗服务系统的数据交互及实时健康管理。

3.2 智能服装系统的关键技术

3.2.1 控制器

智能服装的控制器主要有 Ar-

表 1 智能可穿戴技术在服装中的运用实例

产品应用	系统或平台	主要功能模块	用途	参考文献
腕式可穿戴设备	—	夜间刮擦检测、睡眠及觉醒周期测量	特应性皮炎患者	[16]
智能服装	MSP430	ECG、EMG、呼吸和温度传感器	老龄化社会的健康监测系统	[28]
健康监测智能服装	STM32 单片机	心率、体温、血压测量、无线通信、语音报警、跌倒报警、GPS	老年人和患者的实时监测	[17]
运动化服装	—	USB 接口、数据处理模块、低功耗蓝牙模块、锂电池聚合物、LED 灯、振荡器、多种传感器	生理监测,辅助运动	[29]
智能消防员防护服	Arrietta G25 微机平台	心率、消防员动作检测、监测有毒和爆炸性气体的浓度、衣服内外温度、湿度监测、报警系统、GPS	消防员的工作安全防护	[21]
智能童装外套	Arduino	GPS、蓝牙、嵌入式系统、手机 App	儿童防走失	[26]
婴幼儿可穿戴智能监测服装	Arduino	婴幼儿体温监测、湿度监测、蓝牙通信、报警提醒、手机 App	婴幼儿健康监护	[27]
家庭护理辅助智能服装	MCU	ECG、步数监测、GPS 定位、紧急呼救、电量不足警告、跌倒检测 HMM 算法	健康监护,辅助家庭护理干预	[30]

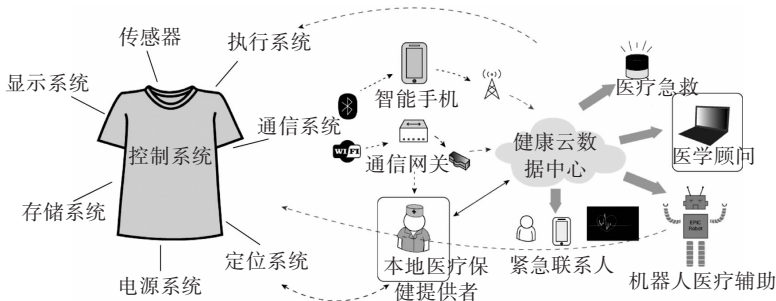


图 3 智能服装系统的通用架构

duino 平台、C51 和 STM 平台。Arduino 平台是当前较受欢迎的电子交互平台,该平台由开源性的硬件部分(包括电路板、微处理器等)和软件部分(编程接口和语言)组成,具有功能多样、轻便易携、价格低廉的特点,适用于交互性的电子设计^[36]。C51 单片机比 Arduino 复杂。STM 系列单片机拥有较为强大的功能,但由于其系统复杂、开发周期长,因此现有智能服装多使用 Arduino 平台作为开发基础。

3.2.2 低功耗无线通信

能耗是影响可穿戴设备发展的一个重要因素,可穿戴设备除了在工作中消耗能量外,与智能终端进行无线通信也会消耗更多能量。采用蓝牙 4.0 技术可保证工作效率,同时最大限度地降低能源损耗。可采用 IEEE 批准的最低功耗 WiFi 标准(IEEE 802.11 ax)^[37],它具有长距离、低功耗和低数据速率等优点,适合物联网应用。

3.2.3 GPS 技术

GPS 在可穿戴儿童服装^[26]、老年人服装^[6]、消防服^[21]中广泛使用。GPS 依据定位方式分为差分定位和单点定位,SIM908 是 2011 年 SIMCOM 公司推出的一款集成 GPS 的 4 频 GSM/GPRS 模块,模块体积为 30.0 mm×30.0 mm×3.2 mm,可以满足用户应用程序中的空间要求,如智能手机、PDA、M2M 追踪和其他移动设备^[38],并且可以使用 Arduino 技术实现定位查询。

3.2.4 手机 App 控制系统

现代社会智能手机已经成为不可或缺的必备用品,因此通过智能手机控制智能服装系统更加方便。手机 APP 的开发可采用 Java 编写的 Android 程序,通过蓝牙模块实现手机与 Arduino 之间的数据传输。

4 智能可穿戴服装面临的问题

智能可穿戴服装现有研究多注重医疗、老年人、婴幼儿的生理监测,在情绪监测方面还需要深入研究。我国智能可穿戴服装方面相关技术并不成熟,主要体现在以下方面。

a. 准确性问题。智能可穿戴服装的数据监测功能,很大一部分依赖于传感器的精确度,应选择性能更好、更适合目标监测形式的传感器;传感器的放置位置也会影响生理监测数据的准确度,如心电图传感器通常位于胸部和肋骨区域以及血液中,氧传感器放置在左侧或右侧肌肉的三头肌^[35]。

b. 系统流畅度问题。算法与功能是系统流畅程度的决定性因素,智能信号处理、数据分析解释、通信标准互操作性、电子元件效率和能源供应发展,是智能可穿戴系统的重要挑战问题。因此,一个好的算法公式和通信系统可以让用户拥有更好的交互体验。

c. 缺乏技术标准。目前对于智能服装系统没有具体要求,对于可穿戴 2.0 服装系统的标准,就是传感器和控制系统与服装的融合度更高、体验感更好、精确度更高,但没有一个给定的数据标准要求,未来可对智能服装系统标准进行建立和完善。

5 结束语

智能可穿戴服装作为一种新型健康监测系统,结合新型纺织制造技术,能克服传统可穿戴设备在健康监测中存在的舒适度低、准确性差、操作复杂、健康监测时长短等问题。智能可穿戴服装能够收集人体各种生理指标、情绪状态,通过物联网、云计算、大数据、机器学习等技术构建移动健康监测平台。除了精进智能可穿戴服装的传感

监测技术外,智能可穿戴服装与智能环境辅助系统之间的物联网交互,更是使服装智能化的一个重要阶梯。未来,兼具功能性和舒适性的智能可穿戴服装具有可观的市场发展前景。

参考文献

- [1] 鄢丽娟,张彦虎.老年人意外摔倒智能报警腰带系统的研究[J].电子技术与软件工程,2018(24):61-63.
- [2] 叶素芬,赖际舟,吕品,等.穿戴式钢琴弹奏手套智能感知与手势识别技术[J].仪器仪表学报,2019,40(5):187-194.
- [3] HUDEC R, MATUSKA S, KAMENČAY P, et al. Concept of a wearable temperature sensor for intelligent textile[J].Advances in Electrical and Electronic Engineering,2020,18(2):92-98.
- [4] 田苗,李俊.智能服装的设计模式与发展趋势[J].纺织学报,2014,35(2):109-115.
- [5] COMMISSION I E, OTHERS. IEC TC 124 strategic business plan (2018)[J].Retrieved April,2018,2:2019.
- [6] RASHIDI P, MIHAILIDIS A. A survey on ambient-assisted living tools for older adults[J].IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics,2013,17(3):579-590.
- [7] FUDICKAR S, SCHNOR B. Kopala mobile orientation system for dementia patients[C]//Proceedings of International Conference on Intelligent Interactive Assistance and Mobile Multimedia Computing. Rostock, Germany: IMC,2009:109-118.
- [8] WAN J, BYRNE C, OHARE G M, et al. Orange alerts: lessons from an outdoor case study[C]//2011 5th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth) and Workshops. Dublin, Republic of Ireland: ICST,2011:446-451.
- [9] 魏庆丽,许鹏,李军,等.基于MSP430

- 的GPS定位智能拐杖设计[J].吉林大学学报:信息科学版,2012,30(5):445-449.
- [10]LIN C C, CHIU M J, HSIAO C C, **et al.** Wireless health care service system for elderly with dementia [J].IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2006, 10(4): 696-704.
- [11]CROMBAG E, PLASMEIJER I R, LUCAS P. Monitoring the elderly using real time location sensing[D].Nijmegen, Netherlands: Radboud University Nijmegen, 2009.
- [12]HODGES S, WILLIAMS L, BERRY E, **et al.** SenseCam: a retrospective memory aid[M].Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006: 177-193.
- [13]PAN L, CHORTOS A, YU G, **et al.** An ultra-sensitive resistive pressure sensor based on hollow-sphere microstructure induced elasticity in conducting polymer film [J].Nature Communications, 2014, 5(1): 3002.
- [14]IERVOLINO O, MEO M. Wearable spiral passive electromagnetic sensor (SPES) glove for sign language recognition of alphabet letters and numbers: a preliminary study[J].Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, 2017, 10166: 49-56.
- [15]AMIT M, CHUKOSKIE L, SKALSKY A J, **et al.** Flexible pressure sensors for objective assessment of motor disorders[J].Advanced Functional Materials, 2020, 30(20): 1905241.
- [16]MAHADEVAN N, CHRISTAKIS Y, DI J, **et al.** Development of digital measures for nighttime scratch and sleep using wrist-worn wearable devices [J].npj Digital Medicine, 2021, 4(1): 42.
- [17]YANG M, CHENG J. Research and development of smart health monitoring clothing system [C]//37th Chinese Control Conference (CCC). Wuhan, China: IEEE, 2018: 1373-1376.
- [18]李海鹏,陈小平,何卫,等.科技助力竞技体育:运动训练中可穿戴设备的应用与发展[J].成都体育学院学报, 2020, 46(3): 19-25.
- [19]程彦钧.英国飞利浦公司的智慧衣发展[J].电子技术, 2005(8): 73-77.
- [20]EDGECOMB S, NORTON K. Comparison of global positioning and computer-based tracking systems for measuring player movement distance during Australian football[J].Journal of Science and Medicine in Sport, 2006, 9(1-2): 25-32.
- [21]BLECHA T, SOUKUP R, KASPAR P, **et al.** Smart firefighter protective suit-functional blocks and technologies[C]//2018 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE). Kuala Lumpur: IEEE, 2018: C4.
- [22]鲁燕燕,谢红珍.可穿戴设备在医疗领域的应用[J].中国医疗器械杂志, 2017, 41(3): 213-215, 230.
- [23]张广,郑捷文,吴太虎.可穿戴技术在军事作业中的应用[J].北京生物医学工程, 2009, 28(2): 210-214.
- [24]张向刚,秦开宇,石宇亮.人体外骨骼服技术综述[J].计算机科学, 2015, 42(8): 1-6.
- [25]JAKUBAS A, LADA-TONDYRA E, NOWAK M. Textile sensors used in smart clothing to monitor the vital functions of young children [C]//2017 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE). Koscielisko, Poland: IEEE, 2017: 1-4.
- [26]刘青,沈雷.基于安全理念的智能童装外套设计[J].毛纺科技, 2018, 46(7): 49-52.
- [27]唐茜,张冰冰,郑笑雨.婴幼儿可穿戴智能监测服装设计[J].纺织学报, 2021, 42(8): 156-160.
- [28]MA Y C, CHAO Y P, TSAI T Y. Smart-clothes-prototyping of a health monitoring platform [C]//2013 IEEE Third International Conference on Consumer Electronics. Berlin: IEEE, 2013: 60-63.
- [29]王爱春,许君,马大力.装备化运动服装新品类开发与产品设计[J].针织工业, 2021(9): 61-65.
- [30]LIN C C, YANG C Y, ZHOU Z, **et al.** Intelligent health monitoring system based on smart clothing [J].International Journal of Distributed Sensor Networks, 2018, 14(8): 155014771879431.
- [31]FERNÁNDEZ-CARAMÉS T, FRAGA-LAMAS P. Towards the internet-of-smart-clothing: a review on IoT wearables and garments for creating intelligent connected E-textiles [J].Electronics, 2018, 7(12): 405.
- [32]CHEN M, MA Y, LI Y, **et al.** Wearable 2.0: enabling human-cloud integration in next generation healthcare systems [J].IEEE Communications Magazine, 2017, 55(1): 54-61.
- [33]FORTINO G, GALZARANO S, GRAVINA R, **et al.** A framework for collaborative computing and multi-sensor data fusion in body sensor networks [J].Information Fusion, 2015, 22: 50-70.
- [34]GE X, YE J, YANG Y, **et al.** User mobility evaluation for 5G small cell networks based on individual mobility model [J].IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(3): 528-541.
- [35]SAYEM M S A, TEAY H S, SHAHARIAR H, **et al.** Review on smart electro-clothing systems (SeCSs) [J].Sensors, 2020, 20(3): 587.
- [36]蔡睿妍. Arduino 的原理及应用 [J].电子设计工程, 2012, 20(16): 155-157.
- [37]KHOROV E, KIRYANOV A, LYAKHOV A, **et al.** A tutorial on IEEE 802.11ax high efficiency WLANs [J].IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(1): 197-216.
- [38]郭坚.基于 SIM908 的无人机空气质量监测系统设计与研究 [D].天津: 天津大学, 2014.

收稿日期 2023年8月11日