

基于柔性传感器的呼吸监测智能服装

许君^{1,2}, 温宇航¹, 李宜潼¹, 何天虹¹, 张诚²

(1. 天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 电子信息与工程学院, 天津 300387)

摘要:为了不影响智能服装正常监测,同时达到服装可清洗目的,对现有智能呼吸监测服装进行分析,设计一种可拆卸佩戴式呼吸监测带T恤。通过围度差测试,确定最适宜呼吸监测的人体部位,设计可拆卸智能监测服装呼吸监测带;同时采用无缝缝合工艺缝制服装,提升服装的舒适性;对呼吸监测智能服装的呼吸波形与呼吸频率进行评估测试,并与两种商用传感器进行对比验证。结果表明,该智能服装与商用传感器监测结果的一致性超过了0.85,呼吸频率的监测准确度高达80%,满足了商用呼吸监测的标准,能够实现人们日常呼吸状态的高精准实时监测。

关键词: 智能服装;呼吸监测;柔性传感器;无缝缝合;可拆卸式

中图分类号: TP 212; TS 941.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2024)05-0464-07

Smart Clothing for Respiratory Monitoring Based on Flexible Sensor

XU Jun^{1,2}, WEN Yuhang¹, LI Yitong¹, HE Tianhong¹, ZHANG Cheng²

(1. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. School of Electronics and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: To avoid influencing the normal monitoring of smart clothing and to achieve the purpose of making the clothing washable, an analysis was carried out on the existing smart respiratory monitoring clothing, and a detachable and wearable respiratory monitoring belt T-shirt was designed. Through the girth difference test, the most suitable body part for respiratory monitoring was determined, and the detachable intelligent respiratory monitoring belt was designed for the clothing. Meanwhile, the seamless sewing process was employed to stitch the clothing, enhancing its comfort. The respiratory waveform and respiratory frequency of the intelligent respiratory monitoring clothing were evaluated and tested, and compared and verified with two commercial sensors. The results indicate that the consistency of the monitoring results between this smart clothing and the commercial sensors exceeded 0.85, and the monitoring accuracy of respiratory frequency was as high as 80%, meeting the commercial respiratory monitoring standards and enabling highly accurate real-time monitoring of people's daily respiratory status.

Key words: smart clothing, respiratory monitoring, flexible sensor, seamless stitching, detachable

智能服装的发展始于20世纪30年代初,由于航空航天及军工领域的需求,研究人员开始着眼于智能服装的研发。1993年,麻省理工学院在美国研发出了一款能够监测人体生理数据的智能背心,这一创新成果推动了智能服装概念的逐步成型与发

展。然而,由于技术条件的限制,当时智能服装的功能性和数据采集的准确性尚不能充分满足人们的实际需求^[1]。随着研究的不断深入,加之其他相关技术的逐步成熟,目前智能服装不仅功能更加丰富,其应用领域也更加广泛^[2-3]。呼吸是反映人体

收稿日期:2023-10-07; 修订日期:2024-03-21。

基金项目:天津市重点实验室开放课题项目(2024LODTS111, 2024LODTS112);纺织行业智能纺织服装柔性器件重点实验室开放课题项目(SDHY2304)。

作者简介:许君(1982—),女,副教授,博士生导师。主要研究方向为智能可穿戴及服装人因设计。

Email: xujun@tiangong.edu.cn

健康的重要生理活动,呼吸频率(respiratory rate)被认为是衡量人体精神负荷和疲劳状态最可靠的指标之一。在运动领域,较低的呼吸频率可以反映出更好的身体素质,保持稳定的呼吸频率可以使运动训练更加持久^[4]。在工业领域,承受着高度压力的劳动者可能会受到动力不足、精力不集中以及身体失调等因素的影响,而这些因素可能导致工伤^[5]。通过智能服装监测呼吸频率可以有效监测人体的健康状况。

近年来,用以呼吸监测的传感器逐渐成为研究热点,已有不同类型的传感元件与服装结合^[6-8],包括压阻式传感器^[9]、电容传感器^[10]、柔性电子传感器^[11-13]等。此外,也出现了以光学传感器为基础进行呼吸监测的研究。相比于其他类型传感器,光纤传感器具有质量轻、生物相容性、灵敏度高、耐腐蚀、抗电磁干扰等诸多优点,适合在各种场景中使用^[14-16]。然而,由于呼吸监测智能服装的集成方式还不成熟,光纤传感器的结构、基底材料以及与面料的融合方式等还需探索,智能监测服装的款式、结构、缝制工艺还有待进一步研究。文中采用课题组已有的成熟传感技术作为传感装置^[17],设计了一种可拆卸呼吸监测带的 T 恤。

1 呼吸监测

人体呼吸运动是指通过呼吸肌的舒缩,使胸腔有规律地扩张和收缩的过程。这一过程包括吸气和呼气,主要由膈肌和肋间肌参与,膈肌位于胸廓的底部,而肋间肌位于相邻的肋骨之间。人体呼吸运动胸腹变化规律如图 1^[18]所示。

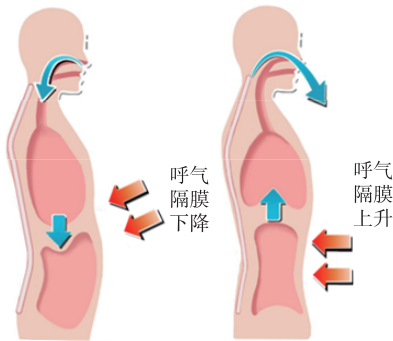


图 1 人体呼吸运动胸腹变化规律

Fig. 1 Principle diagram of thoracic and abdominal changes in human respiratory movement

呼吸感应体积描记法是指使用呼吸速度描记器或压力传感器捕获受试者呼吸产生的空气体积变化,以反映受试者的呼吸频率。根据呼吸感应体积描记技术的基本原理,文中设计了一种新型的呼

吸监测方法。该方法将光纤传感器与非弹性织物结合,穿戴在人体上,人在呼吸过程中,身体胸围或腹围的变化会导致传感器的弹性体随之发生形变,从而改变了弹性体中发光光纤与感光光纤之间的距离。随着这两者间距的变化,感光光纤接收到的光强也随之改变。通过监测感光光纤输出光强的变化幅度,可以准确描绘出呼吸运动的曲线。

1.1 监测区域研究

文中所制备的呼吸监测智能服装虽然保证了人体在日常活动时的监测准确率,但是由于人体运动时上半身皮肤拉伸会对传感器监测结果产生影响,因此,需要研究传感器具体监测位置对监测结果准确性的影响。根据刘鹏林等^[19]关于人体上半身尺寸相关研究,皮肤拉伸变化最明显的是胸部与后背部,其中上胸比下胸皮肤变化大,而皮肤拉伸变化最小的为腹部。人体在呼吸时,胸腹的围度都会产生变化,不同位置的变化各异。LIU F 等^[20]在人体自然呼吸的状态下,使用投影仪传感器系统在健康男性上半身标记 800 ~ 1 000 个亮点进行呼吸运动评估测量,得出腹部的起伏变化最明显。周锐^[21]在人体上半身不同位置进行监测时,发现腹部的监测效果最好。总体而言,人体呼吸时在腹部的呼吸监测效果最明显。

根据人体呼吸运动与人体皮肤的拉伸变化,在腹部确定监测区域为最佳选择。人体的腹部分为上腹部、中腹部、下腹部,具体如图 2 所示。上腹部位置范围在胸围线正下方 5 ~ 10 cm,该部位在呼吸运动过程中胸腔起伏较大,因此上腹部围度变化较大,但当人体呈站立式坐姿等不同姿势时,该区域的围度变化较小。上腹部与下胸廓处于同一水平线,脂肪堆积较少,因此将呼吸传感器放置于此,既能最大限度地感知呼吸运动引起的弹性体拉伸变化,又能较好地适应人体不同姿态的变化,最适合作为监测区域进行测试。

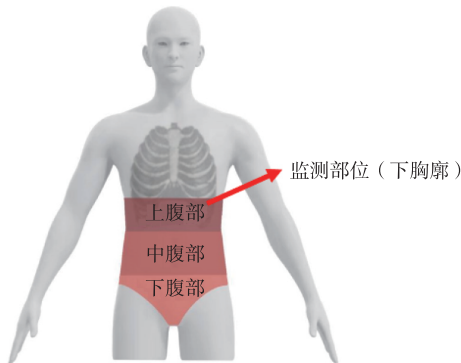


图 2 人体腹部分区

Fig. 2 Abdominal partitions of the human body

1.2 人体监测区域呼吸围度差实验

由于传感器弹性体的最佳拉伸变化区域在弹性体伸长率的前 10% ,需要研究监测区域自然状态下的呼吸围度差,保证呼吸监测传感器的灵敏度。为了研究监测区域的呼吸围度差,选取 5 名来自华北地区的24~25 岁男女志愿者,在监测区域上、中、下 3 个点测量自然状态下呼吸造成的围度差,具体如图 3 所示。

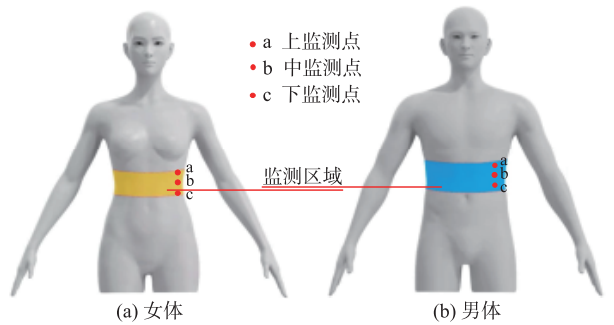


图 3 呼吸监测区域
Fig. 3 Respiratory monitoring area

为保证测试的准确性,志愿者穿着贴身服装保持自然站立,并按照测试要求自然吸气与呼气,测试者用伸缩围度卷尺测量志愿者检测区域并记录围度大小,测量时卷尺保持同一水平线。该测试利用呼吸差来表示前后两个围度的差距,在每个测试点记录 5 次呼吸差,取其平均值作为此测试点的呼吸差大小。

志愿者呼吸测试结果见表 1。男性自然状态下的呼吸差范围在 1~1.8 cm,女性自然状态下的呼吸差在 0.5~1.5 cm。由于男女正常状态下的呼吸差都不超过 2 cm,因此,文中设定所用传感器弹性体的最佳拉伸长度为 2 cm,以保证传感器监测的灵敏度。

表 1 志愿者呼吸测试结果

Tab.1 Breath test of volunteers 单位:cm

性别	志愿者	测试点围度差		
		a	b	c
男	M ₁	1.1	1.2	1.1
	M ₂	1.3	1.3	1.4
	M ₃	1.8	1.5	1.6
	M ₄	1.1	1.1	1.3
	M ₅	1.6	1.7	1.6
女	W ₁	1.0	1.1	1.1
	W ₂	0.8	0.9	0.9
	W ₃	1.0	1.1	1.1
	W ₄	0.5	0.5	0.6
	W ₅	0.6	0.8	0.7

2 智能服装设计成衣

2.1 服装设计

由于呼吸监测装置需要贴合人体才能获得准确的生理数据,因此紧身的弹性服装是最理想的选择。文中设计的智能服装为一件贴身 T 恤,效果如图 4 所示。考虑到服装的洗涤需求,将带式传感器穿插在服装夹层中方便拿取,服装整体线条流畅,符合现代人的审美要求。此外,该 T 恤采用无线缝合工艺,在接缝处通过高温和一定的压力使热熔胶带融化,从而将衣片拼接黏合。此工艺不仅适用于高弹性面料,同时也避免了人体皮肤对缝份突起的排斥,提高了服装的舒适性。



图 4 智能 T 恤效果

Fig. 4 Schematic diagram of smart T-shirt

2.2 成衣展示

智能服装实物如图 5 所示。图 5(a)为男模特(服装号型为 175/92A)的试穿效果,该服装使用无缝贴合工艺制备,其与人体的贴合度高,穿着效果良好。图 5(b)为真人试穿效果,将带式传感器放置在服装夹层中,可以看出传感器与人体高度贴合且更加稳固,服装表面的凸起是因为带式传感器中的电路板与柔性电源具有一定的厚度,但并不影响人体的正常活动。图 5(c)为成衣不同部位的贴合细节,没有任何溢胶与开裂,表明服装的贴合工艺达到了成品要求。



图 5 智能服装实物效果
Fig. 5 Physical drawing of intelligent clothing

3 智能服装监测准确度测试

3.1 仪器

监测采用两种商用传感器:HKH-11C 呼吸波传感器,由合肥华科电子技术研究所制造,是一款专为呼吸监测设计的腰带式传感器,能够精准监测呼吸波形;YS20 睡眠呼吸监测仪,由深圳云中飞电子有限公司生产,传感器采用呼吸监测面罩的形式,主要用于监测呼吸频率。这两款商用传感器能够提供高效且准确的呼吸健康监测服务。

3.2 方法

为了验证智能服装监测准确性,将智能服装分别与商用呼吸波形传感器和呼吸监测面罩进行对照验证。将呼吸监测服装所测呼吸波形与商用呼吸波传感器进行对比,通过皮尔逊相关系数验证两者之间的相关性;同时将呼吸监测服装所测呼吸频率与呼吸监测面罩的对比,引入 BlandAltman 统计分析方法对比监测结果的一致性。

3.3 受试者

为了适配服装的穿着需求,选择 5 名华北地区 24~25 岁健康无任何呼吸系统疾病的志愿者参与呼吸监测准确度测试,志愿者的基本信息见表 2。

表 2 5 位志愿者的基本信息

Tab. 2 Size information of the five volunteers				
志愿者	性别	身高/cm	体质量/kg	监测区域 围度/cm
1	女	168	56.0	85
2	女	172	60.5	87
3	男	176	69.5	92
4	男	180	72.0	95
5	男	181	80.0	91

4 结果与分析

4.1 呼吸波形准确度测试

为了验证呼吸监测智能服装对不同人体呼吸波形监测的准确性,选择商用带式呼吸波传感器进行同步监测对比实验。测试前,志愿者穿着呼吸监测智能服装,并调节服装中传感腰带的围度使之更好地贴合人体,同时将商用带式呼吸波传感腰带佩戴在呼吸监测智能服装的外侧。测试时间为 1 min,在测试期间同时记录两个设备的呼吸信号数据。5 名志愿者两种传感器的呼吸波形如图 6 所示。

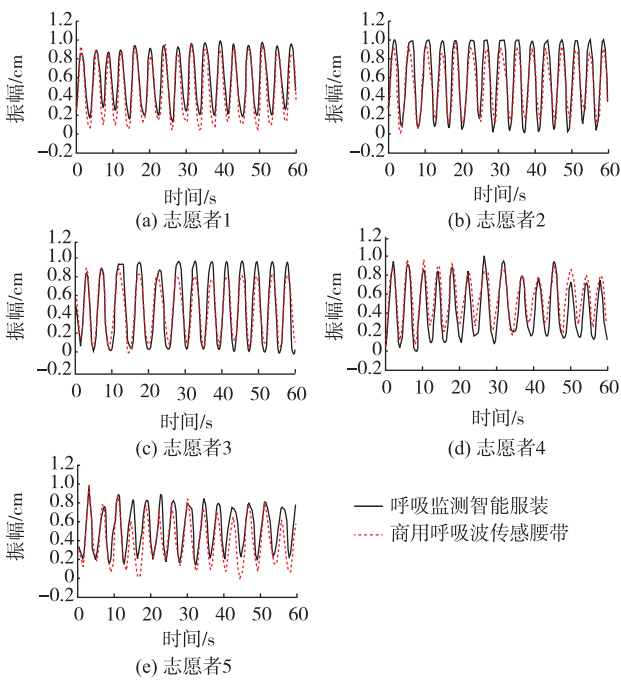


图 6 5 名志愿者两种传感器的归一化呼吸信号
Fig. 6 Normalized respiratory signal plots from two sensors for five volunteers

为了揭示呼吸监测智能服装和商用呼吸波传感器测量结果之间的关系,将两种传感器 1 min 的呼吸数据归一化,并引入皮尔逊相关系数来衡量两个测量数据之间的线性相关度,公式为

$$r = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{N \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (1)$$

式中: x_i 和 y_i 分别为两个特征属性的数据样本值, i 为志愿者编号($i = 1, \dots, 5$); N 为数据样本的大小。

两个特征属性之间样本的皮尔逊相关系数取值范围为 $-1 \sim 1$ 。当相关系数的值为 1 时,两个变量之间成正相关;值为 -1 时,两个特征属性之间呈现负相关关系;当相关性系数取值接近 0 时,意味着两个特征之间具有极弱的线性关系。一般情况下,皮尔逊相关系数大于 0.8,表明两个特征之间有很强的相关性。两种监测方式呼吸数据对比见表 3。由表 3 可知,5 名志愿者的两种呼吸监测数据皮尔逊相关系数均大于 0.85,且显著性较低($p < 0.000\ 1$),表明所制备的呼吸监测智能服装与标准呼吸监测设备的监测数据高度相关,两种呼吸传感器呼吸波形有较好的一致性,证明文中所设计的智能呼吸监测服装可用于准确的呼吸波形监测研究。

表 4 智能服装与商用呼吸面罩呼吸频率监测结果

Tab. 4 Respiratory monitoring smart clothing and commercial breathing masks respiratory frequency monitoring																
动作	志愿者 1			志愿者 2			志愿者 3			志愿者 4			志愿者 5			
	R_M	R_N	\bar{d}	R_M	R_N	\bar{d}	R_M	R_N	\bar{d}	R_M	R_N	\bar{d}	R_M	R_N	\bar{d}	
静态坐姿 正常呼吸	18	18	0	17	18	-1	13	13	0	15	15	0	17	16	1	
	18	17	1	17	17	0	13	14	-1	14	14	0	16	16	0	
	17	17	0	17	17	0	14	14	0	15	15	0	16	16	0	
	17	17	0	17	17	0	14	14	0	15	15	0	16	16	0	
	17	17	0	16	17	-1	13	13	0	14	14	0	16	16	0	
静态站立 正常呼吸	18	18	0	15	16	-1	14	13	1	14	14	0	16	16	0	
	18	18	0	15	15	0	13	13	0	15	15	0	15	15	0	
	17	18	-1	16	16	0	14	14	0	15	15	0	16	15	1	
	17	17	0	16	16	0	14	14	0	15	14	1	15	15	0	
	17	17	0	16	16	0	15	15	0	14	14	0	15	15	0	
步行正常呼吸	18	18	0	17	16	1	15	14	1	17	16	1	15	15	0	
	18	19	-1	17	17	0	14	14	0	16	16	0	19	18	1	
	19	19	0	16	16	0	14	15	-1	16	16	0	18	18	0	
	19	19	0	16	17	-1	15	15	0	16	16	0	18	18	0	
	19	18	1	17	17	0	15	15	-1	15	16	-1	18	18	0	
慢跑正常呼吸	22	22	0	20	21	-1	19	20	-1	18	19	-1	18	18	0	
	22	23	-1	21	23	-2	21	20	1	18	18	0	20	20	0	
	22	22	0	21	21	0	19	19	0	19	18	1	21	20	1	
	20	22	-2	21	21	0	20	19	1	19	18	1	20	20	0	
	21	21	0	20	20	0	20	20	0	19	19	0	20	20	0	

使用 Bland-Altman 分析法对 Bland-Altman 图进行数据观察分析,以 $\alpha = (R_M + R_N)/2$ 为 x 轴, $d = R_M - R_N$ 为 y 轴,进行散点 Bland-Altman 图绘制。当两种结果出现偏差时,这种偏差可以使用差值的平均值 \bar{d} 来表示,差值的标准差 S 可以用来表示差

表 3 两种监测方式呼吸数据对比结果

Tab. 3 Comparison of respiratory data between the two monitoring methods

志愿者	相关性系数 r	显著性 p	样本量 N
1	0.965 11	<0.000 1	600
2	0.921 01	<0.000 1	600
3	0.955 13	<0.000 1	600
4	0.928 8	<0.000 1	600
5	0.857 82	<0.000 1	600

4.2 呼吸频率准确度测试

为了验证呼吸监测智能服装对不同人体呼吸频率监测的准确性,选择商用呼吸监测面罩进行同步监测对比实验。在测试前,志愿者穿着呼吸监测智能服装,由测试者调节服装中传感腰带的围度,使腰带刚好贴合人体,面部佩戴呼吸面罩,测试不同动作下的呼吸频率,每隔 20 s 同时记录两个传感器的呼吸频率,每位志愿者每组动作共记录 5 组数据。呼吸监测智能服装与商用呼吸面罩呼吸频率监测结果见表 4。由表 4 可知 4 种动作下 5 名受试者使用两种传感器的呼吸频率与误差,其中: R_M 为智能服装监测的呼吸频率, R_N 为呼吸面罩监测的呼吸频率, d 为两组测试数据间的差值,即 $d = R_M - R_N$, \bar{d} 为差值 d 的平均值。

值平均值 \bar{d} 的波动,如果偏差符合正态分布,那么 95% 的差值将位于一致性限值上限 $\bar{d} + 1.96 \times S$ 和一致性限值下限 $\bar{d} - 1.96 \times S$ 之间。根据一致性界限内的数据最大值和最小值以及一致性界限外的数据数量,对所制作的呼吸监测智能服装的呼吸频

率一致性与准确性进行评估。

呼吸监测智能服装与呼吸监测面罩的 Bland - Altman 一致性检验如图 7 所示。由图 7 可知, 5 名志愿者每种动作下两种传感器呼吸频率的 Bland-Altman 分析结果[x 轴为 $(R_M + R_N)/2$; y 轴为 $R_M - R_N$], 设置可接受的最大误差为每分钟 2 次, 因为多组数据的 $R_M - R_N$ 平均值相同, 图中有重

合点。5 名志愿者采集到的 100 对呼吸频率结果中, 处于 95% 一致性界限外的有 3 对, 占总采集数据的 3%, 小于 5% 界限值在可接受的范围内。其中志愿者 1, 2 的最大误差为 2 r/min, 处于可接受的最大误差范围内。因此, 文中所设计的智能服装采集的数据与商用呼吸监测面罩采集的数据具有良好的一致性。

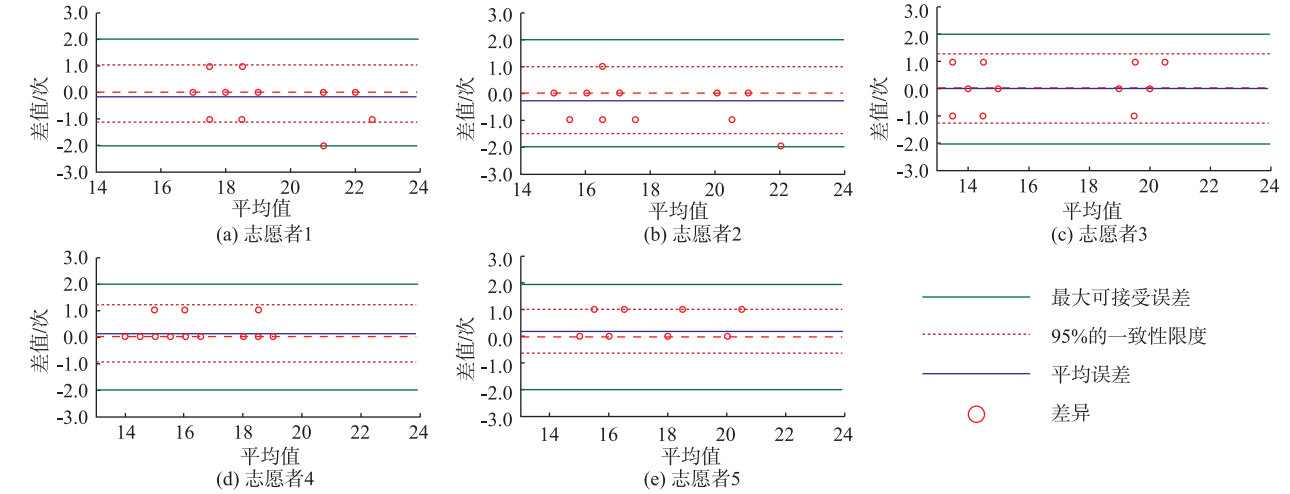


图 7 呼吸监测智能服装与呼吸监测面罩的 Bland - Altman 一致性检验

Fig. 7 Bland-Altman consistency test of respiratory monitoring smart garments with respiratory monitoring masks

为了分析智能服装监测呼吸频率的准确度, 以商用呼吸波传感器所测数据为标准, 将智能服装监测数据与商用呼吸波传感器测得的数据进行相关性分析。5 名志愿者的两种呼吸监测数据皮尔逊相关系数均大于 0.85, 且显著性较低 ($p < 0.0001$), 表明所制备的呼吸监测智能服装与标准呼吸监测设备的监测数据高度相关, 证明文中所设计的智能呼吸监测服装的呼吸频率监测准确度较高。以呼吸面罩所测得的人体呼吸频率为标准, 在静止状态下(静止坐立、静止站立)智能监测服装呼吸频率监测的准确度高达 80%; 步行状态下的呼吸频率监测准确度为 70%; 慢跑状态下为 50%。多数情况下智能服装与呼吸面罩监测呼吸频率的误差为 1, 但由于两种传感器算法的呼吸区间不同, 以及显示数字的时间不同, 因而产生差异。一般静止状态下的监测准确度大于慢跑状态, 因为在静态下人体呼吸频率比慢跑状态下更加稳定, 两种测试结果都验证了文中制备的智能服装在呼吸监测方面具有较高的监测准确度。

5 结 语

文中通过对人体呼吸运动胸腹部的变化以及日常运动对上身皮肤拉伸影响的研究, 确定了传感器的监测区域为上腹部区域。通过人体监测区域

呼吸差实验得到了弹性体长度为 2 cm 时是传感器的最佳拉伸区间。结合光纤传感技术与服装设计 and 制造技术, 开发了一件用于监测人体呼吸频率的智能腰带与智能服装。将智能监测服装与商用传感器共同上身监测, 分析与带式商用传感器呼吸波形的皮尔逊相关系数, 以及与呼吸面罩呼吸频率的误差, 验证了智能监测服装呼吸波形以及呼吸频率的准确性。文中设计的智能 T 恤服装, 具有可拆卸腰带, 实现了服装的可洗涤性; 同时, 使用无线缝合工艺缝制服装, 增强了服装的穿着舒适性, 可应用于健康监测、医疗卫生、运动训练等多个领域。

参考文献:

[1] 沈雷, 孙湉. 智能可穿戴领域研究现状和发展趋势 [J]. 服装学报, 2023, 8(2): 125-133.
SHEN Lei, SUN Tian. Intelligent wearable research status and its development trend [J]. Journal of Clothing Research, 2023, 8(2): 125-133. (in Chinese)
[2] 宋炜宁, 张佩华. 基于三维模拟的智能文胸压力舒适性优化设计 [J]. 服装学报, 2023, 8(4): 315-322.
SONG Weining, ZHANG Peihua. Pressure comfort optimization design of intelligent bra based on 3D simulation [J]. Journal of Clothing Research, 2023, 8(4): 315-322. (in Chinese)
[3] 张士进, 刘红, 田明伟. 消防服智能化改进的研究进展 [J]. 服装学报, 2023, 8(4): 323-329.

- ZHANG Shijin, LIU Hong, TIAN Mingwei. Research progress of intelligent improvement of firefighting clothing [J]. *Journal of Clothing Research*, 2023, 8(4): 323-329. (in Chinese)
- [4] WANG X Q, YIN J. Application of machine learning in safety evaluation of athletes training based on physiological index monitoring [J]. *Safety Science*, 2019, 120: 833-837.
- [5] GATTI U C, SCHNEIDER S, MIGLIACCIO G C. Physiological condition monitoring of construction workers [J]. *Automation in Construction*, 2014, 44: 227-233.
- [6] 周金利, 王政, 周知艇, 等. 基于智能柔性织物传感器的漏尿频次监测系统研究[J]. *现代纺织技术*, 2024, 32(3): 91-101.
- ZHOU Jinli, WANG Zheng, ZHOU Zhiting, et al. Research on the urine leakage frequency monitoring system based on intelligent flexible fabric sensors [J]. *Advanced Textile Technology*, 2024, 32(3): 91-101. (in Chinese)
- [7] 张诚, 马雪慧, 赵军发, 等. 基于虚拟游标增敏的法布里-珀罗温度传感器[J]. *中国激光*, 2023, 50(13): 195-203.
- ZHANG Cheng, MA Xuehui, ZHAO Junfa, et al. Fabry-perot temperature sensor based on virtual vernier sensitization [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(13): 195-203. (in Chinese)
- [8] 张美玲, 赵美玲, 张诚, 等. 用于呼吸监测的光纤传感织物制备及其性能[J]. *纺织学报*, 2023, 44(5): 102-111.
- ZHANG Meiling, ZHAO Meiling, ZHANG Cheng, et al. Fabrication and properties of optical fiber sensing fabrics for respiratory monitoring [J]. *Journal of Textile Research*, 2023, 44(5): 102-111. (in Chinese)
- [9] AW K, BUDD J, WILSHAW-SPARKES T. Data glove using soft and stretchable piezoresistive sensors [J]. *Micromachines*, 2022, 13(3): 372.
- [10] ZHANG Q, WANG Y L, XIA Y, et al. Textile-only capacitive sensors for facile fabric integration without compromise of wearability [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(10): 1900485.
- [11] DU X J, TIAN M W, SUN G S, et al. Self-powered and self-sensing energy textile system for flexible wearable applications [J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2020, 12(50): 55876-55883.
- [12] 张诚, 温晓钰, 许君, 等. 智能服装呼吸监测光纤织物传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(13): 52-59.
- ZHANG Cheng, WEN Xiaoyu, XU Jun, et al. Respiratory monitoring fiber optic fabric sensor for smart clothing [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2023, 60(13): 52-59. (in Chinese)
- [13] XU J, ZHOU Y C, ZHANG C, et al. Development and evaluation of a respiratory monitoring smart garment based on notched optical fiber sensing fabric [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(15): 14892-14902.
- [14] SUN G K, HU Y, DONG M L, et al. Flexible membrane curvature sensor based on multilayer polyimide substrate and optical fiber implantation [J]. *Optik*, 2019, 176: 559-566.
- [15] 杨翔文, 罗彬彬, 吴德操, 等. 基于夹层多模光纤干涉计的可穿戴呼吸传感器[J]. *光学学报*, 2023, 43(3): 29-38.
- YANG Xiangwen, LUO Binbin, WU Decao, et al. Wearable respiratory sensor based on sandwich multimode fiber interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(3): 29-38. (in Chinese)
- [16] 王馨雨, 田明伟. 阿尔茨海默病患者智能服装的发展趋势[J]. *服装学报*, 2023, 8(2): 134-140.
- WANG Xinyu, TIAN Mingwei. Development trends on intelligent clothing of Alzheimer's disease patient [J]. *Journal of Clothing Research*, 2023, 8(2): 134-140. (in Chinese)
- [17] XU J, LI T, LI Y T, et al. Fabrication and application of a grooved optical fiber respiratory sensor based on geometric parameter optimization by optical simulation [J]. *Optics Laser Technology*, 2023, 167: 109747.
- [18] 李旭. 人体呼吸系统的动力学及运动数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2023.
- [19] 刘鹏林, 王永进. 人体上半身体表变化对软壳冲锋衣结构设计的影响[J]. *服装学报*, 2018, 3(2): 100-105.
- LIU Penglin, WANG Yongjin. Influence of upper body surface changes on the structure design of soft shell jacket [J]. *Journal of Clothing Research*, 2018, 3(2): 100-105. (in Chinese)
- [20] LIU F, KAWAKAMI M, TAMURA K, et al. Feasibility of a respiratory movement evaluation tool to quantify thoracoabdominal movement for neuromuscular diseases [J]. *Respiratory Care*, 2017, 62(4): 423-431.
- [21] 周锐. 柔性可穿戴放疗呼吸运动监测系统的研究[D]. 广州: 暨南大学, 2020.

(责任编辑:张雪)