

文章编号: 1004-7220(2021)01-0116-06

基于床垫动态压力检测的胸腹呼吸运动 无束缚监测方法

赵兴利, 齐德瑄, 刘今越, 郭士杰

(河北工业大学 机械工程学院, 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 河北省机器人感知与人机融合重点实验室, 天津 300130)

摘要:目的 开发一种适用于日常居家使用的无束缚睡眠呼吸监测方法, 实现睡眠呼吸暂停综合征 (sleep apnea syndrome, SAS) 及呼吸系统疾病的无束缚筛查。方法 提出一种基于床单式柔性压力传感器的无束缚胸腹呼吸监测方法, 通过检测呼吸时胸部和腹部作用于床垫的动态压力获取呼吸信息。对 10 名健康受试者进行无束缚监测与胸腹呼吸带监测的对比实验, 验证所提方法的有效性。结果 床单式柔性压力传感器可以检测呼吸时胸部和腹部作用于床垫的动态压力, 并据此获取呼吸波形和呼吸率信息。其中, 呼吸率与胸腹呼吸带的输出结果相同, 而呼吸动态压力波形与胸腹呼吸带输出信号在相位上存在差异, 该差异与受试者的睡姿和性别有关。建立胸式呼吸有限元模型, 对呼吸运动的相位差异进行初步分析。结论 床单式柔性压力传感器可以无束缚监测呼吸时胸部和腹部运动, 具有判别 SAS 类型的潜力。由于胸腹运动存在力学耦合关系, 欲利用动态压力识别胸腹运动的相位差, 进一步需进行解耦研究。

关键词:睡眠呼吸暂停综合征; 床单式柔性压力传感器; 胸腹运动; 体压变动

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.01.019

Unconstrained Monitoring of Sleep Respiration Based on Detection of Pressure fluctuations on Mattress

ZHAO Xingli, QI Dexuan, LIU Jinyue, GUO Shijie

(School of Mechanical Engineering, State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei Key Laboratory of Robot Sensing and Human-Robot Interaction, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Objective To develop a method for monitoring unconstrained sleep respiration suitable for daily use at home, so as to realize high precision screening of sleep apnea syndrome (SAS) or other respiratory diseases without affecting normal sleep. **Methods** A new unconstrained measurement method using sheet-type flexible pressure sensor was proposed. This method could obtain the information of respiratory motions of the chest and abdomen by measuring the pressure fluctuations of the chest and abdomen acting on the mattress. Experiments were conducted on ten healthy subjects to confirm effectiveness of the proposed method by comparing the result of the unconstrained measurement and those of respiratory inductance plethysmography (RIP) using band sensors, respectively. **Results** Sheet-type flexible pressure sensor could measure the pressure fluctuations of the chest and abdomen acting on the mattress during respiration and obtain respiratory waveform and respiratory rate. The respiratory rate measured with the sheet-type flexible pressure sensor agreed with those obtained by

收稿日期: 2019-12-06; 修回日期: 2020-02-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61871173), 河北省高等学校科学技术研究重点项目 (2D2015084)

通信作者: 刘今越, 教授, E-mail: ljy@hebut.edu.cn

RIP. The gender and the lying position greatly affected whether the phases of the pressure fluctuations of the chest and abdomen measured with the flexible sensor differed from those obtained by RIP. The chest respiratory finite element model was established to analyze the phase difference of respiratory movement. **Conclusions** Sheet-type flexible pressure sensor is effective to monitor unconstrained sleep respiration, indicating the potential to identify the SAS types. But further researches of motion decoupling are required to identify the phase difference between the chest motion and the abdomen motion, which are coupled with each other.

Key words: sleep apnea syndrome (SAS); sheet-type flexible pressure sensor; chest/abdomen motion; pressure fluctuation

睡眠呼吸暂停综合征 (sleep apnea syndrome, SAS) 是中老年常见疾病, 不仅影响患者的睡眠质量, 还会引发高血压、心脏病、糖尿病等疾患^[1-2]。多导睡眠图被认为是诊断 SAS 的权威手段, 然而该方法操作复杂、费用昂贵, 且对被监测者束缚性强, 不宜用于日常监测。临床上的初筛检查通常使用胸腹呼吸带传感器或脉搏血氧仪^[3]。胸腹呼吸带通过测量呼吸或呼吸用力时胸腹扩张收缩引起的胸围和腹围变化来筛查 SAS 及其类型, 由于对被监测者束缚性强, 不宜用于居家长期监测。因此, 寻求一种无束缚的监测方法, 一直是呼吸监测领域的热点研究方向之一。

目前, 国内外无束缚睡眠呼吸监测方法可归纳为非接触型和间接接触型。非接触型利用微波生物雷达、光学、电容、超声波等手段进行监测^[4-9]; 间接接触型通过检测振动或压力变化监测呼吸^[10-13]。这些方法所获取的信号均为胸腹运动的叠加信号, 能够监测呼吸率, 然而无法区分胸部与腹部运动。光学方法虽然能够区分胸腹运动, 但是操作复杂, 而且其检测精度易受使用者身体表面覆盖物的影响^[14-16]。

本文提出一种利用床单式柔性压力传感器的无束缚监测方法, 具有区分胸腹运动的潜力^[17-18]。此方法利用胸部和腹部作用于床垫的动态压力获取呼吸信号。通过与胸腹呼吸带比较, 探索不同睡姿下呼吸时身体作用于床垫的动态压力及其胸腹膨胀收缩运动的关系, 验证所提方法监测呼吸运动的可行性。

1 实验方法

1.1 实验设置

使用的床单式柔性压力传感器采用电容原理,

利用柔性高分子材料制成, 长、宽各为 1 m, 厚度为 5 mm, 空间分辨率为 20 mm × 20 mm, 采样频率为 10 Hz。通过测量身体作用于床垫的静态压力及其变化 (动态压力) 检测睡姿、体动和呼吸。信号处理系统把静态压力分布作为图像, 利用图像识别方法识别受试者的睡姿和胸腹部的位置, 并在胸部、腹部位置提取呼吸运动引起的动态压力信号。

为研究呼吸时身体作用于床垫的动态压力与胸腹扩张收缩运动的关系, 进行胸腹呼吸带同步对比实验。实验使用的呼吸带为 Embla N7000 PSG 系统标配胸腹呼吸带。胸腹呼吸带检测胸部和腹部的周长变化, 输出信号在胸部或腹部膨胀时表现为增加, 收缩时表现为减小。为降低噪声并获得稳定且有效的呼吸信号, 实验人员接受临床医生和 PSG 技术人员的指导, 参照临床上常见的安装方式对胸腹呼吸带进行安装。胸部呼吸带安装在肋骨 L5~6 之间, 腹部呼吸带安装于脐部位置 (见图 1)。

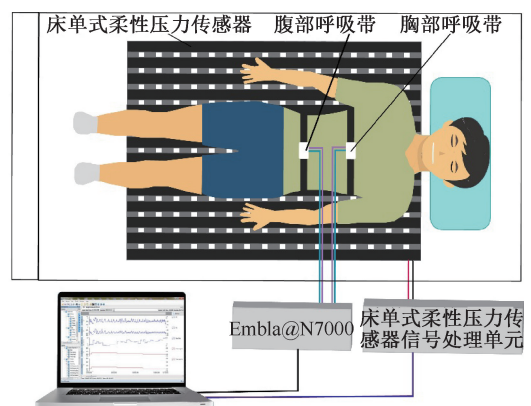


图1 实验设置概念图

Fig.1 Sketch of experiment setup

对 10 名受试者进行实验, 男、女各 5 名, 年龄 23~27 岁, 身体质量指数 (body mass index, BMI) 为

(25.1 ± 7.7) kg/m^2 。各受试者均身体健康且无呼吸系统疾病史,在详细阅读本实验的目的以及流程后签署知情同意书,实验遵守《赫尔辛基宣言》的伦理原则。实验前受试者保证充足睡眠,避免剧烈运动和食用可能影响呼吸率的食物和药物。受试者在实验人员的协助下佩戴胸腹呼吸带,躺在铺有柔性触觉传感器阵列的床垫上。每位受试者首先平静呼吸5 min,然后胸腹呼吸带与传感器阵列同步开始采集数据。每位受试者分别在平躺、左侧卧、右侧卧3种睡姿下测试5 min。图2所示为1位男性受试者平躺睡姿下的照片和柔性压力传感器检测到的静态压力分布。通过胸腹部作用于床垫动态压力获取的数据包括:呼吸引起的胸腹运动、脉搏和体动^[19]。其中,呼吸信号为低频时变信号,振幅和周期都有可能随时间而变化,故采用能够更精确表征周期和振幅变化的小波滤波对原始信号进行降噪。

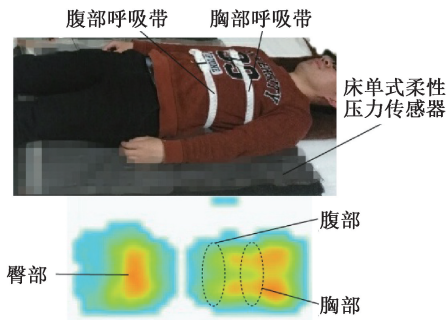


图2 胸腹呼吸带安装位置和床单式柔性压力传感器测得的静态体压分布

Fig.2 Positions of chest/abdominal band sensors and distribution of static body pressure measured by the sheet-type flexible pressure sensor

2 柔性压力传感器与胸腹呼吸带实验结果比较

对10名受试者静息状态时分别在仰卧和侧卧两种睡姿下进行柔性压力传感器检测与胸腹呼吸带检测的同步对比实验。实验结果显示,柔性压力传感器检测到的胸腹部动态压力与胸腹呼吸带的输出信号具有明显的相关性,两者所检测到的呼吸率(respiratory ratio, RR)完全相同,而两者相位有所不同(见表1)。

呼吸是人的基本生命体征,分为腹式呼吸与胸式呼吸,男性多以腹式呼吸为主,女性多以胸式呼

表1 受试者身体特征及监测结果

Tab.1 Physical characteristics of the subjects and measurement results

受试者	性别	年龄	BMI/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	睡姿	RR/(min^{-1})	
					柔性压力 传感器	胸腹呼 吸带
S1	男	26	32.8	仰卧	17	17
				侧卧	16	16
S2	男	24	22.9	仰卧	20	20
				侧卧	19	19
S3	男	23	21.1	仰卧	16	16
				侧卧	16	16
S4	男	23	21.7	仰卧	18	18
				侧卧	18	18
S5	男	23	21.6	仰卧	16	16
				侧卧	16	16
S6	女	25	19.2	仰卧	21	21
				侧卧	22	22
S7	女	24	20.8	仰卧	17	17
				侧卧	17	17
S8	女	25	23.1	仰卧	20	20
				侧卧	19	19
S9	女	27	18.2	仰卧	18	18
				侧卧	18	18
S10	女	26	17.4	仰卧	20	20
				侧卧	20	20

吸为主^[20]。实验中,认真观察受试者的呼吸方式,发现5名男性受试者均为腹式呼吸,5名女性受试者均为胸式呼吸。图3所示为男性受试者S4与女性受试者S8的实验结果。不管是男性还是女性,也不管是仰卧还是侧卧睡姿,胸腹呼吸带检测到的信号都显示胸部和腹部扩张收缩运动的相位相同;然而柔性压力传感器检测到的胸腹部动态压力的相位却依存于睡姿,并且具有性别差异,总结如下。

(1) 男性受试者:不管是仰卧还是侧卧,腹部动态压力的相位与腹部呼吸带输出信号相同,而胸部动态压力的相位与胸部呼吸带输出信号相反。该结果表明,男性吸气时,尽管胸部和腹部都在膨胀,而柔性压力传感器在腹部检测到压力增加,在胸部却检测到压力减小。这一结果不依存于睡姿。

(2) 女性受试者:仰卧睡姿下的胸腹部动态压力与胸腹呼吸带输出信号为同相位,而在侧卧睡姿下,胸部动态压力与腹部动态压力呈反相位,其中胸部动态压力的相位与胸部呼吸带的输出信号一致,而腹部则相反。该结果表明,女性在仰卧睡姿下吸气时,伴随胸部和腹部的膨胀,柔性压力传感

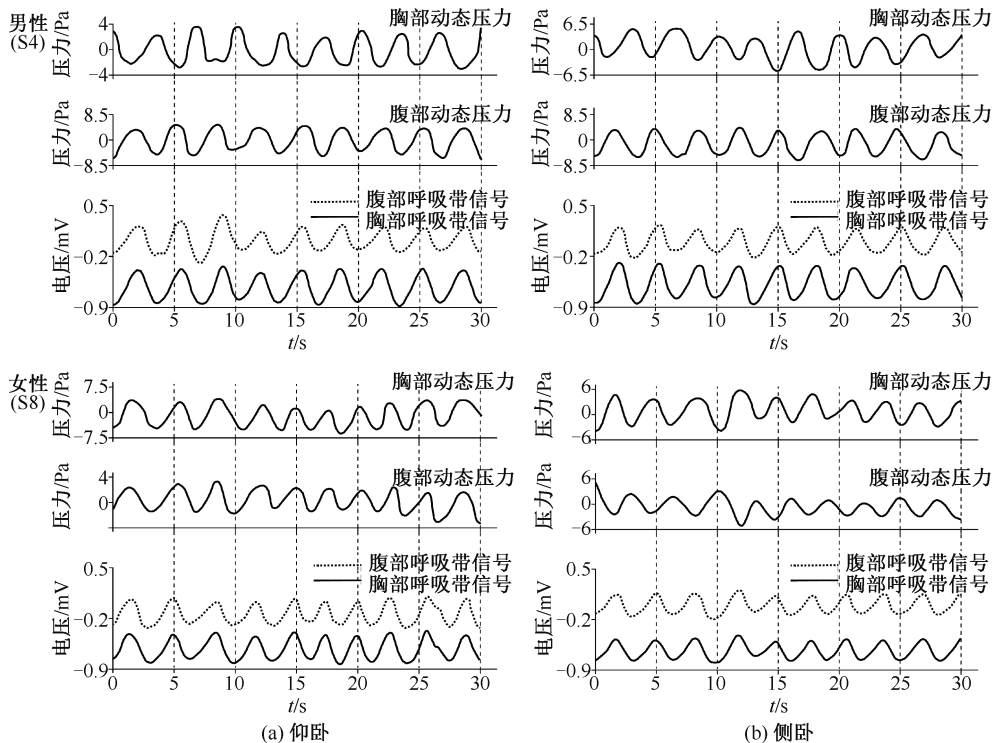


图3 不同睡姿下胸腹呼吸运动床单式柔性压力传感器与胸腹呼吸带检测对比实验结果

Fig.3 Comparison of experimental results from respiratory motions of chest and abdomen measured by sheet-type flexible pressure sensor and by band sensors at different sleeping positions (a) Supine position, (b) Lateral position

器在胸部和腹部都检测到压力增加;女性在侧卧睡姿下吸气时,尽管腹部膨胀,然而柔性压力传感器却检测到压力减小。

3 讨论

实验中认真观察每位受试者胸腹部的呼吸运动,发现男性受试者以腹式呼吸为主,膈肌为主要动力源;女性受试者以胸式呼吸为主,肋间外肌为主要动力源,这与 Kaneko 等^[20]的研究结果一致。

胸部运动与腹部运动之间存在复杂的力学耦合关系,陈柳洁等^[21-22]从导致阻塞性呼吸暂停的机理入手,通过建立上气道有限元模型,分析 OSAHS 患者自然睡眠期呼吸模式对上气道流场的影响。进一步需要对睡眠呼吸时胸腹耦合运动进行生物力学分析^[23]。本文采用有限元方法对睡眠呼吸时胸腹耦合引起的动态压力变化进行数值分析。人体的呼吸运动是肋间肌、膈肌、胸锁乳突肌、腹壁肌、斜方肌等肌肉共同作用的结果,其中胸式呼吸以肋间外肌为主,腹式呼吸以膈肌为主。本文以仰

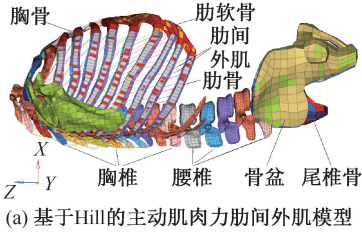
卧胸式呼吸为例,分析吸气过程中肋间外肌收缩时胸廓与脊柱的运动特点。

本文使用欧盟人类安全工程计划开发的 HUMOS2 人体有限元模型,该模型已被广泛用于汽车碰撞中乘员与行人的损伤预测与评估,并得到有效性验证^[24]。然而,现有的商用人体有限元模型无法直接进行人体呼吸系统的运动模拟,需要对模型修改后才能应用于睡眠呼吸有限元分析。根据解剖学与生理学知识,肋间外肌位于相邻两根肋骨之间与肋骨外表面平齐,起于上位肋骨下缘止于下位肋骨上缘斜向前下方,肋软骨处的肋间肌退化为结缔组织主要起连接与固定作用。肋间外肌建模采用 Hill 主动肌肉力模型。Hill 模型包括收缩单元、弹性单元、阻尼单元三部分,具有主动收缩特性可以很好的模拟肌肉的收缩过程^[25]。

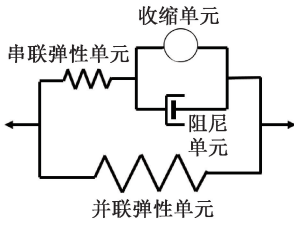
图4所示建立基于 Hill 模型的肋间外肌模型,代替人体模型中原有的被动呼吸肌模型,以模拟仰卧睡姿下胸式呼吸运动^[26]。

$$F = F_{max} \cdot A(t) \cdot f_a(l) \cdot f_a(v) + \frac{f_p(l)}{f_p(l) + |D \cdot v_x|} \quad (1)$$

式中： F_{max} 为初始定义肌肉力； $A(t)$ 为时间与主动肌肉力激活度的关系曲线； $f_a(l)$ 为伸长率与主动肌肉力激活度的关系曲线； $f_a(v)$ 为速度与主动肌肉力激活度的关系曲线； $f_p(l)$ 为应变或位移与被动肌肉力的关系曲线； D 为阻尼系数； v_x 为速度。



(a) 基于Hill的主动肌肉力肋间外肌模型



(b) Hill主动肌肉力模型

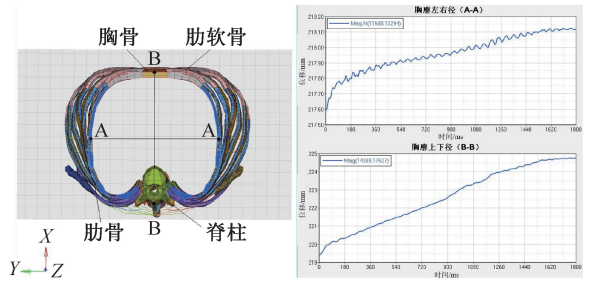
图4 胸式呼吸动力学模型

Fig.4 Dynamic model of respiratory motions of chest

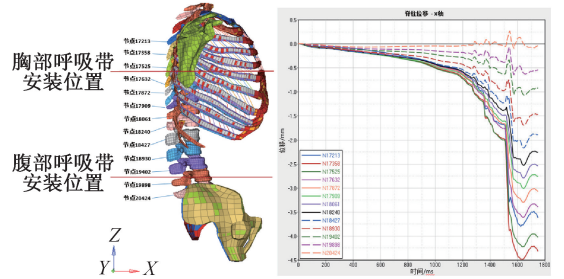
- (a) Active intercostal muscle model based on Hill,
- (b) Hill's active muscle model

肋间外肌收缩拉动肋骨绕脊柱运动,图5所示为肋骨L5处(胸部呼吸带安装位置)胸廓尺寸的变化情况。胸廓左右径为胸骨中心到T6胸椎的距离变化。胸部左右径与前后径尺寸均增大,左右径尺寸由217.6 mm增加至218.1 mm,前后径尺寸由219.5 mm增加至224.7 mm,该结果与实验结果(胸腹呼吸带的检测结果)基本一致。肋骨的运动对脊柱产生作用力,引起脊柱沿X轴负向的运动趋势,其中T5胸椎位移量最大,T6、T4胸椎次之,向尾部方向位移量依次减小。因此,胸式呼吸仰卧睡姿下肋间外肌收缩引起肋骨绕脊柱旋转,使胸腔上下径与左右径增大。

肋骨的运动并不是单一运动,而是多个肌肉共同作用下的复杂运动并伴随自身的变形,本文只模拟了肋间外肌引起的肋骨运动,尚不能建立动态压力与周长变化之间的映射关系。需要进一步通过有限元解析与实验相结合的方法,揭示胸



(a) 肋间外肌收缩时胸廓直径尺寸变化



(b) 肋间外肌收缩时脊柱运动

图5 肋间外肌收缩时胸廓运动

Fig.5 Thoracic movement during the contraction of the intercostal externals (a) Thoracic diameter changes during contraction of external intercostal muscle, (b) Spinal movement Characteristics during contraction of intercostal externals

腹耦合运动的机理,建立更为准确和便于实时求解的力学模型,以便建立动态压力与胸腹膨胀收缩运动之间的映射关系,实现SAS的高精度无束缚监测。

4 结论

针对胸腹呼吸带束缚性强,不便于日常睡眠呼吸监测,以及当前所开发的无束缚监测方法都不能区分胸腹运动这一难题,本文提出一种利用床单式柔性压力传感器对胸腹运动进行无束缚监测的新方法,通过与临床上常用的胸腹呼吸带比较,验证所提出方法具有无束缚监测仰卧和侧卧睡姿下胸部和腹部呼吸运动的能力。由于胸腹运动相互耦合,柔性压力传感器检测到的胸腹部动态压力与胸腹呼吸带输出信号在相位上有所不同。本文建立了人体呼吸有限元模型,初步分析了肋间外肌收缩引起肋骨与脊柱的运动特点。由于胸腹呼吸运动是由呼吸肌牵拉骨骼运动以及胸腹部器官的运动变形等多种运动共同引起的,进一步研究需要综合考虑各种因素,建立胸腹呼吸运动数值模型,明

确胸腹呼吸运动耦合机理,为提高无束缚胸腹呼吸运动的检测精度提供理论依据。

参考文献:

- [1] 何权瀛, 陈宝元, 张希龙. 解读“睡眠呼吸暂停与心血管疾病专家共识”[J]. 中国实用内科杂志, 2010, 30(2): 116-121.
- [2] 盐见利明. 睡眠无呼吸症[M]. 北京: 麻仓书店出版社, 2013: 10-36.
- [3] CARDOZO J. New AASM recommendations for sensors: A simple guide for the sleep technologist [J]. *Sleep Diagn Ther*, 2008, 21(3): 20-21.
- [4] 祁富贵, 张华, 李盛, 等. 一种基于小波信息熵的非接触呼吸暂停检测技术研究[J]. *医疗卫生装备*, 2015, 36(4): 1-4.
- [5] TOPOREK G, PETERHANS M, KETTENBACH J, *et al.* Real-time respiratory motion detection with optical patient tracking method [C]//*Proceedings of the 26th CARS Congress*. Palace; [s.n.], 2012: 1-3.
- [6] 陈永康, 侯振杰, 陈宸, 等. 基于深度图像的非接触式呼吸检测算法研究[J]. *计算机测量与控制*, 2017, 25(7): 213-217.
- [7] HWANG Y, KIM JB, BANG WC, *et al.* Robust real-time respiratory motion tracking using ultrasound image sequences [C]// *Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium*. Dresden; IEEE, 2012: 1666-1669.
- [8] 徐礼胜, 薄红瑞, 赵金野, 等. 基于体动射频信号的睡眠分期[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(8): 1079-1083.
- [9] CHANG WY, HUANG CC, CHEN CC, *et al.* Design of a novel flexible capacitive sensing mattress for monitoring sleeping respiratory [J]. *Sensors*, 2014, 14(11): 22021-22038.
- [10] VEKHAOJA A, PELTOKANGAS M, VERHO J, *et al.* Combining the information of unconstrained electrocardiography and ballistography in the detection of night-time heart rate and respiration rate [J]. *Int J Monit Survel Tech Res*, 2013, 1(3): 52-67.
- [11] KURIHARA Y, WATANABE K. Development of unconstrained heartbeat and respiration measurement system with pneumatic flow [J]. *IEEE T Biomed Circ S*, 2012, 6(6): 596-604.
- [12] ZHU X, CHEN WX, NEMOTO T, *et al.* Real-time monitoring of respiration rhythm and pulse rate during sleep [J]. *IEEE T Biomed Eng*, 2006, 53(12): 2553-2563.
- [13] TOSHIHARU M, KAZUYA M, YO K, *et al.* Unconstrained measurement of lying position, respiration and heartbeat using a tactile sensor on a bed [J]. *Trans JSME*, 2014, doi: 10.2316/P.2014.818-014.
- [14] XIA J, SIOCHI RA. A real-time respiratory motion monitoring system using KINECT; Proof of concept [J]. *Med Phys*, 2012, 39(5): 2682-2685.
- [15] KUMAR M, VEERARAGHAVAN A, SABHARWAL A. Distance PPG: Robust non-contact vital signs monitoring using a camera [J]. *Biomed Opt Express*, 2015, 6(5): 1565-1588.
- [16] ISAO S, YOSHIMITSU A. Screening system for chronic obstructive pulmonary disease using fiber grating sensor with two cameras [J]. *Med Imag Tech*, 2012, 30(2): 73-82.
- [17] GUO SJ, KATO Y, ITO H, *et al.* Development of rubber-based flexible sensor sheet for care-related apparatus [J]. *SEI Tech Rev*, 2012 (75): 125-131.
- [18] GUO SJ, SHIRAOKA T, INADA S, *et al.* A two-ply polymer-based flexible tactile sensor sheet using electric capacitance [J]. *Sensors*, 2014, 14(2): 2225-2238.
- [19] 夏明一. 以应变式传感器为核心的人体脉搏信号采集与处理[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(4): 423-428.
- [20] KANEKO H, HORIE J. Breathing movements of the chest and abdominal wall in healthy subjects [J]. *Resp Care*, 2012, 57(9): 1442-1451.
- [21] 陈柳洁, 张湘民, 肖潭. 阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征生物力学研究进展[J]. *医用生物力学*, 2015, 30(3): 285-290.
- CHEN LJ, ZHANG XM, XIAO T. Progress of biomechanical research on obstructive sleep apnea hypopnea syndrome [J]. *J Med Biomech*, 2015, 30(3): 285-290.
- [22] 陈柳洁, 张湘民, 肖潭. OSAHS 患者自然睡眠期呼吸模式对上气道流场的影响[J]. *医用生物力学*, 2016, 31(6): 540-547.
- CHEN LJ, ZHANG XM, XIAO T. Effects of breathing patterns on flow field in upper airway of an OSAHS patient during natural sleep [J]. *J Med Biomech*, 2016, 31(6): 540-547.
- [23] 张振军, 孙艺菊, 廖振华, 等. 有限元法在腰椎融合术与置换术生物力学研究中应用进展[J]. *医用生物力学*, 2018, 33(1): 82-88.
- ZHANG ZJ, SUN YT, LIAO ZH, *et al.* Progress of finite element method applied in biomechanical researches on lumbar fusion and replacement [J], *J Med Biomech*, 2018, 33(1): 82-88.
- [24] ROBIN S. HUMOS; Human model for safety. A joint effort towards the development of refined human-like car occupant models [C]// *Proceedings of the 17th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*. Amsterdam; [s.n.], 2001: 1-9.
- [25] ROMERO F, ALONSO FJ. A comparison among different Hill-type contraction dynamics formulations for muscle force estimation [J]. *Mech Sci*, 2016, 7(1): 19-29.
- [26] RATNOVSKY A, ZARETSKY U, SHINER RJ, *et al.* Integrated approach for *in vivo* evaluation of respiratory muscles mechanics [J]. *J Biomech*, 2003, 36(12): 1771-1784.