

柔軟面状触覚センサを用いた呼吸と心拍の計測

松尾 一矢*, 向井 利春 (理化学研究所), 加藤 陽, 清水 厚輝, 郭 士傑 (東海ゴム工業)

Measurement of Respiration and Heartbeat Using a Flexible Tactile Sensor Sheet on a Bed

Kazuya Matsuo*, Toshiharu Mukai (RIKEN), Yo Kato, Atsuki Shimizu, Shijie Guo (Tokai Rubber Inds.)

Abstract

We describe a measurement method of respiration and heartbeat using Smart Rubber sensor, a rubber-based flexible tactile sensor sheet developed by us. This method is useful for recognizing person's conditions: sleeping soundly, sleeping lightly, lying down, sitting on a bed, and so on. Our goal is to watch over those who require nursing care. The proposed method measures respiration and heartbeat as follows. First, we measure body pressure by using Smart Rubber sensor placed on a bed. Then, the method applies a frequency analysis to the time series data of the body pressure. Finally, respiration and heartbeat are obtained by extracting suitable frequency bands. In the experiments, we show that respiration and heartbeat have been successfully measured.

キーワード：生体情報計測, 呼吸, 心拍, 無拘束計測, 柔軟面状触覚センサ.

(Monitoring, Respiration, Heartbeat, Unconstrained measurement, Tactile, Rubber-based flexible sensor sheet.)

1. 序 論

日本では、2010年から2020年までの10年間で、65歳以上の高齢者が約2900万人から約3600万人へと700万人ほど増え、社会全体の高齢化率も23.0%から29.1%に急増すると予想されている[1,2]。それに伴い、要介護者も増えると考えられるが、介護職員の増加が追いつかないため、職員ひとりあたりの負担が大きくなると見込まれている[3]。したがって、介護職員の負担軽減のために、ロボット介護機器の導入の必要性が高まっている。

ロボット技術の介護利用における重点分野として、移乗介助、移動支援、排泄支援、認知症の方の見守り、入浴支援の5分野が経済産業省と厚生労働省により策定されている[4]。このうちの認知症の方の見守りとして、センサを用いてベッドの上の被介護者の状態を識別できれば、介護職員の負担軽減に大きく貢献できる。識別すべき被介護者の状態としては、ベッド上にいるかいないか、上体を起こしているか横になっているか、横になっているなら仰向けかうつぶせかなどがある。さらに、被介護者の体勢に加え、眠りの深さなどの睡眠状態も計測できると有用である。睡眠状態を観測して睡眠の質を高めることは、被介護者の健康状態を良好に保つのに効果的である。

睡眠状態を計測する方法として、睡眠ポリソムノグラフィ検査がよく知られている[5]。この手法では、脳波、心電図、眼球運動、頤筋電図、呼吸曲線を測定し、R&K法[6]に基づいて、睡眠状態を覚醒、レム睡眠、ノンレム睡眠ステージ1~4の6段階に分類する。高い精度で睡眠状態を計測できるという利点があるが、生体信号を測定するために多くのセンサを体に取り付けなければいけないため、計測に拘束感が伴い、自然な睡眠を妨げる恐れがある。また、生体信号から睡眠状態を識別するために検査技師の判断が必要であり、自動化が困難であるという問題もある。ゆえに、被験者に負担をかけることなく、睡眠状態を簡便に計測で

きる手法の開発が求められている。

呼吸数や心拍数、体動数が測定できれば、睡眠状態を推定できる[7]。例えば、心拍数と睡眠状態との間には、強い相関があることが認められている[8]。無拘束かつ非侵襲な睡眠計測手法はいくつも報告されている[9-17]。渡辺らは、空気圧方式のマットレス型センサを用いて心拍、呼吸、体動、イビキ、咳を測定し[18-20]、レム睡眠時に呼吸数と心拍数が増加してリズムが不規則になることなどから睡眠状態を推定する手法[9,10]を開発している。また、赤外線モーションセンサやカメラを用いて測定した体動に着目した研究[11,12]もある。

本稿では、面状触覚センサを用いて人の呼吸と心拍を計測する手法を提案する。ベッドに敷いた触覚センサで測定した圧力情報から呼吸と心拍を計測できれば、圧力分布の移動から得られる体動と併せて睡眠状態を推定できる。また、触覚センサを用いることで、ベッド上の人の位置や姿勢も分かるので、被介護者の見守りにも役立つと考えられる。

2. 呼吸と心拍の計測手法

柔軟面状触覚センサを用いて測定した圧力情報から、人の呼吸と心拍を計測する手法を提案する。まず、ベッドに敷いた触覚センサを用いて、横になっている人の体圧を測定する。次に、人の胸部にあたる範囲のセンサセルが測定した体圧の時系列データに対して、周波数解析を適用する。そして、適切な周波数帯域を抽出することで、人の呼吸と心拍を取得する(図1)。

〈2・1〉 体圧データの周波数解析 ベッドに横になっている人の体圧の時系列データに対して周波数解析を行い、測定した圧力情報から呼吸と心拍を取り出す。この周波数解析には、高速フーリエ変換[21,22](Fast Fourier Transform, 以下FFTと呼称)を用いた。

人が息を吸い込むと胸が膨らむ。また、心拍による体圧の変化は心臓の周辺で特に大きくなると考えられる。そこ

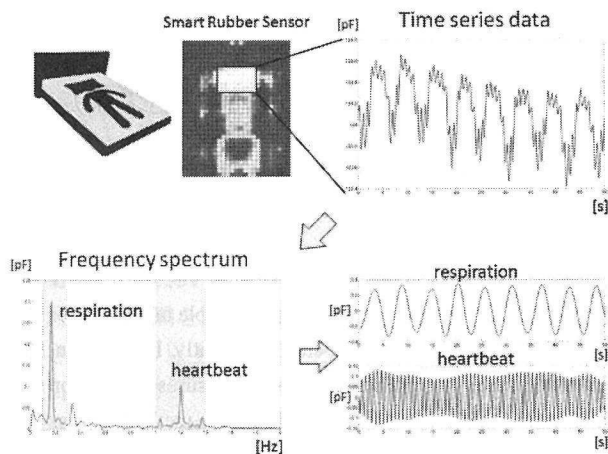


図1 提案手法の概要図

Fig. 1. Measurement method of respiration and heartbeat using a flexible tactile sensor sheet.

で、胸部にあたる範囲のセンサセルの測定データに対して、周波数解析を行った。

〈2・2〉 呼吸と心拍の抽出 安静にしているとき、呼吸と心拍はほぼ一定の周期を保つ。したがって、体圧の時系列データから適切な周波数帯域を抽出すれば、呼吸と心拍を計測できる。抽出した周波数帯域を時間領域の信号に戻すことで、呼吸と心拍の波形を求めることができる。

3. 柔軟面状触覚センサ

提案手法を行うためには、ベッドに横になっている人の体圧を測定するセンサが必要である。我々は、柔軟で伸縮性のある面状触覚センサである Smart Rubber (SR) センサ [23] (東海ゴム工業) を用いた。SR センサは配線を含めてすべてゴム系の材料で作られている。そのため十分に柔らかく伸縮性があり、被験者に違和感を覚えさせない測定が可能である。ベッドに敷いた SR センサを用いることで、非侵襲かつ無拘束にベッド上の人々の体圧を測定できる。

SR センサは、柔軟で伸縮性のある 2 枚の導電性ゴムシートの電極で、薄い誘電層をはさんだ構造をしている (図 2)。両側の電極の本数をそれぞれ m 本と n 本とすると、両側の電極が交差するところごとに静電容量センサができるので、全体では $m \times n$ 個のセルが構成される。

本稿で使用した SR センサの外観と寸法を図 3 に示す。また、このセンサの仕様を表 1 に示す。この SR センサは、センサに対して加わる力の垂直方向成分を測定する。人がベッドの上で安静にしているとき、接線方向成分は無視できると考えられる。

4. 呼吸と心拍の計測実験

提案手法の有効性を評価するために、ベッドに敷いた SR センサの上に横になっている人の呼吸と心拍を計測する実験を行った。実験は仰向けとうつぶせと横向きの 3 種類の姿勢で行った。その 3 種類の姿勢を図 4 に示す。抽出する呼吸と心拍の周波数帯域は、予備実験により以下のように

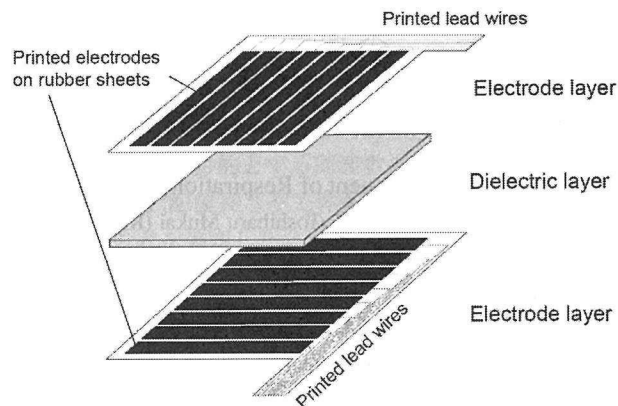


図2 スマートラバーセンサの構造概念図

Fig. 2. Schematic structure of Smart Rubber sensor.

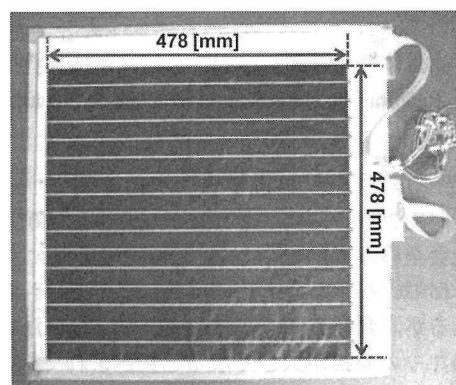


図3 SR センサの外観

Fig. 3. Photograph of the SR sensor.

表1 SR センサの仕様

Table 1. Specifications of the SR sensor

| Number of cells | 256 | |
|-----------------------------|----------|----------|
| | Length | Width |
| | 16 | 16 |
| Size of sensor sheet | 478 [mm] | 478 [mm] |
| Size of a sensor cell | 28 [mm] | 28 [mm] |
| Size of a gap between cells | 2 [mm] | 2 [mm] |
| Sampling rate | 20 [Hz] | |

決定した。(1) 呼吸の周波数帯域は 0.1[Hz]~ 0.3[Hz] (6[回/分]~ 18[回/分]) とする。(2) 心拍の周波数帯域は 1.0[Hz]~ 1.5[Hz] (60[回/分]~ 90[回/分]) とする。なお、被験者は 30 歳の男性である。また、被験者の胸部にあたる位置の 4 セルの出力の平均値を体圧データとした。

提案手法による呼吸と心拍の計測結果と比較するために、呼吸センサと心拍センサを用いた測定をそれぞれ行った。呼吸センサを図 5 に、心拍センサを図 6 に示す。呼吸センサは胸部に巻き、胸の膨らみから 50[Hz] で呼吸を測定する。心拍センサは電極を胸部に取り付け、100[Hz] で心電を測定する。

〈4・1〉 呼吸の計測結果 3 種類の姿勢について、測定

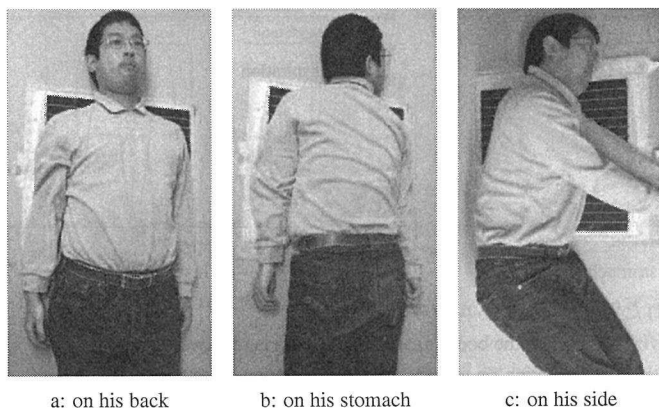


図4 呼吸と心拍の計測実験を行う3種類の姿勢
Fig. 4. Photographs of the three postures.

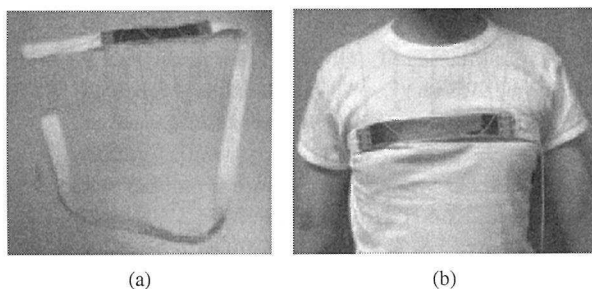


図5 呼吸センサの外観と測定時の使用法
Fig. 5. (a) Photograph of the respiratory sensor. (b) The subject wearing the respiratory sensor.

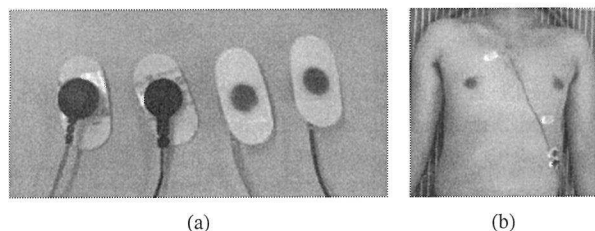


図6 心拍センサの外観と測定時の使用法
Fig. 6. (a) Photograph of the heartbeat sensor. (b) The subject wearing the heartbeat sensor.

した体圧データにFFTを適用して得られた周波数スペクトルを図7に示す。FFTを行うためにはデータ数が2の累乗である必要があるため、1024個(51.2秒間)の体圧データを用いた。使用したSRセンサの測定周波数は20[Hz]なので、ナイキスト周波数は10[Hz]となるが、2[Hz]より高い周波数帯域の値はほぼ0であるため、0[Hz]から2[Hz]までの範囲のみを表示している。どの姿勢でも、呼吸の周波数帯域(0.1[Hz]~0.3[Hz])で高いピークが得られている。

呼吸の周波数帯域を抽出して時間領域の信号に戻すことで得られた呼吸の波形を図8に示す。青い実線がSRセンサによる計測結果を表しており、赤い点線が呼吸センサによる測定結果を表している。両者はよく似ており、提案手

法により呼吸を計測できていることが確かめられた。

〈4・2〉心拍の計測結果 心拍についても呼吸と同様に計測実験を行った。測定した体圧データにFFTを適用して得られた周波数スペクトルを図9に示す。どの姿勢でも、心拍の周波数帯域(1.0[Hz]~1.5[Hz])に明確なピークが認められる。また、心拍センサの出力値にFFTを適用した結果を図10に示す。図9と図10を比較することで、SRセンサで測定した体圧データから得られたピークが、心拍によるものであることが確認できた。

心拍の周波数帯域を抽出して時間領域の信号に戻すことで得られた心拍の波形を図11に示す。青い実線がSRセンサによる計測結果を表しており、赤い点線が心拍センサで測定した心電を表している。どの姿勢でも、SRセンサによる心拍の計測結果と心電の周期はほぼ一致している。このことから、提案手法により心拍を計測できていることが確かめられた。

5. 結論

柔軟面状触覚センサを用いて測定した圧力情報から、人の呼吸と心拍を計測する手法を提案した。実験を行い、提案手法によりベッドに横になっている人の呼吸と心拍を正しく計測できることを確認した。

今後の課題は、人に対する触覚センサの適切な位置を自動で決定する手法の開発である。今回の実験では、センサの位置は人が試行錯誤して決定したが、適切なセンサの位置を自動的に決定できれば、人の動きに対して頑健な計測を行うことができる。

参考文献

- (1) 総務省統計局: “平成22年国勢調査”, 2011年10月26日公表. <<http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2010/index.htm>>, (2014年2月27日アクセス).
- (2) 国立社会保障・人口問題研究所: “日本の将来推計人口-平成23(2011)年~平成72(2060)年-”, 2012年3月30日公表. <<http://www.ipss.go.jp/syoushika/tohkei/newest04/sh2401top.html>>, (2014年2月27日アクセス).
- (3) 厚生労働省: “医療・介護に係る長期推計”, 2011年6月2日公表. <<http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/syakaihoshou/syutyukento/dai10/siryou1-2.pdf>>, (2014年2月27日アクセス).
- (4) 経済産業省, 厚生労働省: “ロボット技術の介護利用における重点分野”, 2012年11月22日公表. <<http://robotcare.jp/>>, (2014年2月27日アクセス).
- (5) 日本睡眠学会編: “臨床睡眠検査マニュアル”, ライフ・サイエンス, 2006.
- (6) A. Rechtschaffen and A. Kales: “A Manual of Standardized Terminology, Techniques and Scoring System for Sleep Stages of Human Subjects”, Bethesda, Md.: U.S. Dept. of Health, Education, and Welfare, Public Health Services-National Institutes of Health, National Institute of Neurological Diseases and Blindness, Neurological Information Network, 1968.
- (7) 日本睡眠学会編: “睡眠学ハンドブック”, 朝倉書店, 1999.
- (8) 渡邊崇士, 渡辺嘉二郎: “無拘束エアマットレス型生体セ

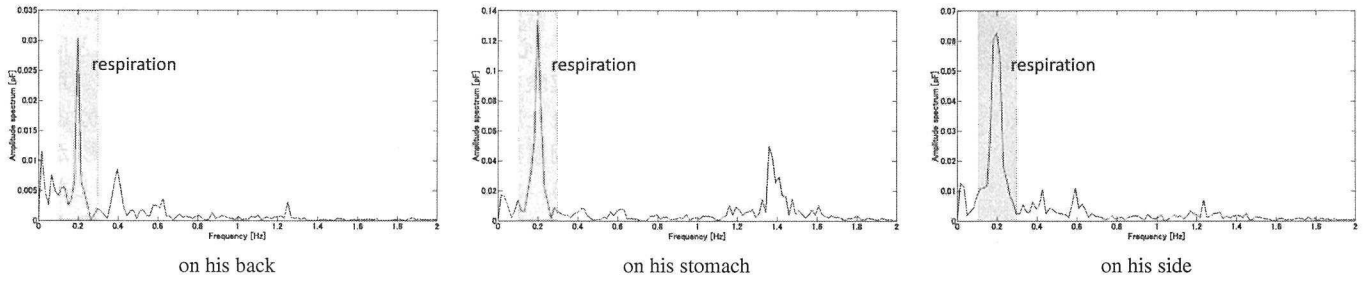


図7 体圧データにFFTを適用して得られた周波数スペクトル（呼吸の計測）

Fig. 7. Frequency spectrums of the three postures by applying the FFT to the body pressure for measuring the respiration. The three postures are 'lying on his back', 'lying on his stomach', and 'lying on his side'. Every horizontal axis represents the frequency range of from 0 to 2 hertz. Every vertical axis represents the amplitude spectrum.

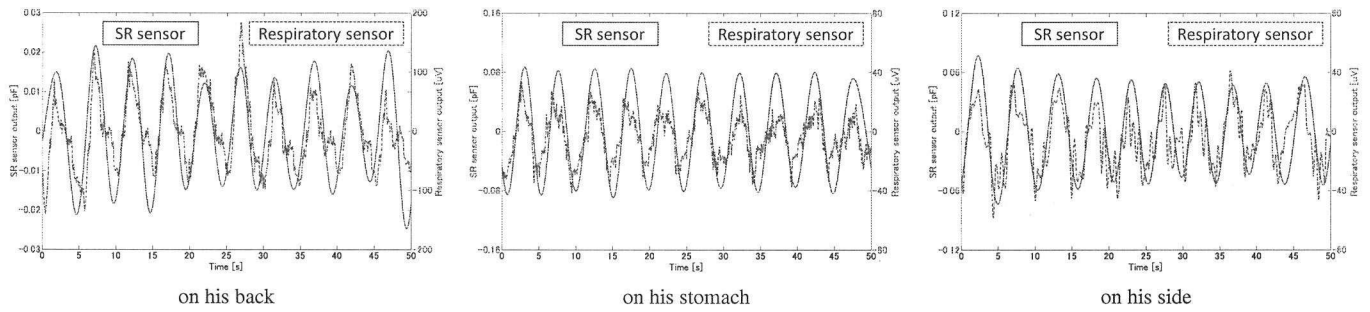


図8 呼吸の計測結果

Fig. 8. Measurement results of the respiration of the three postures. Every blue line indicates the respiratory waveform obtained by our method. Every red line indicates the output value of the respiratory sensor.

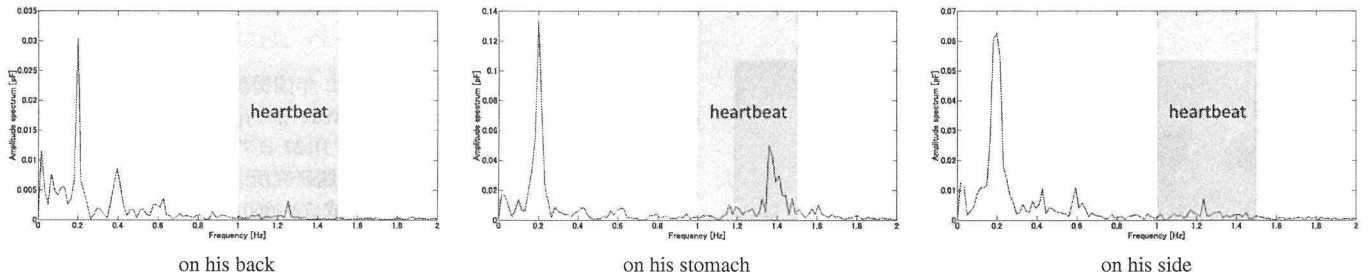


図9 体圧データにFFTを適用して得られた周波数スペクトル（心拍の計測）

Fig. 9. Frequency spectrums of the three postures by applying the FFT to the body pressure for measuring the heartbeat.

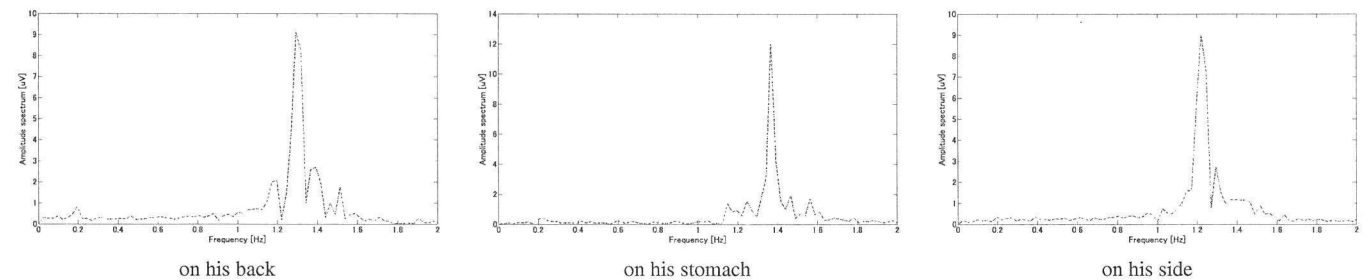


図10 心拍センサの出力値にFFTを適用して得られた周波数スペクトル

Fig. 10. Frequency spectrums of the three postures by applying the FFT to the output of the heartbeat sensor.

ンサによる睡眠段階の推定 -心拍数変動と睡眠段階-, 計測自動制御学会論文集, Vol. 37, No. 9, pp. 821-828, 2001.

(9) Y. Kurihara and K. Watanabe: "Sleep-Stage Decision Algo-

rithm by Using Heartbeat and Body-Movement Signals", *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part A*, Vol. 42, No. 6, pp. 1450-1459, 2012.

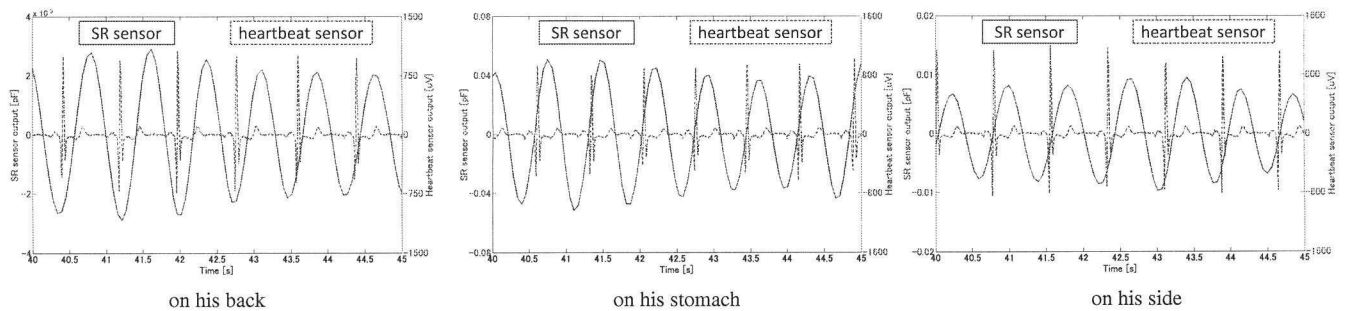


図 11 心拍の計測結果

Fig. 11. Measurement results of the heartbeat of the three postures. Every blue line indicates the heartbeat waveform measured by our method. Every red line indicates the output value of the heartbeat sensor.

- (10) T. Watanabe and K. Watanabe: "Noncontact Method for Sleep Stage Estimation", *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, Vol. 51, No. 10, pp. 1735–1748, 2004.
- (11) Y. Kambayashi and H. Hagiwara: "Estimating Sleep Cycle Using Body Movement Density", *Proc. of the 2012 5th Int'l Conf. on Biomedical Engineering and Informatics*, pp. 1029–1033, 2012.
- (12) 岡田志麻, 大野ゆう子, 検見崎兼治, 王媛媛, 筒井杏奈: "動画像による睡眠時の体動検出", *日本感性工学学会論文誌*, Vol. 8, No. 3, pp. 709–715, 2009.
- (13) A. Deguchi and H. Hagiwara: "Evaluation of Heart Rate Variability and Respiratory Variability during Sleep Using a Lorenz Plot", *Journal of Sleep and Biological Rhythms*, Vol. 9, No. 4, p. 366, 2011.
- (14) 土井滋貴, 長井一郎, 佐久間崇, 高橋晴雄: "ニューラル・ネットワークを用いた人の動き情報からの睡眠状態判定法の開発", *電気学会論文誌 C*, Vol. 114, No. 11, pp. 1160–1165, 1994.
- (15) R. M. Harper, V. L. Schechtman, and K. A. Kluge: "Machine Classification of Infant Sleep State Using Cardiorespiratory Measures", *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, Vol. 67, No. 4, pp. 379–387, 1987.
- (16) T. Salmi and L. Leinonen: "Automatic Analysis of Sleep Records with Static Charge Sensitive Bed", *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, Vol. 64, No. 1, pp. 84–87, 1986.
- (17) K. Otsuka, Y. Ichimaru, T. Yanaga, and Y. Sato: "Studies of Arrhythmias by 24-hour Polygraphic Recordings: Relationship between Atrioventricular Block and Sleep States", *American Heart Journal*, Vol. 105, No. 6, pp. 934–940, 1983.
- (18) Y. Kurihara and K. Watanabe: "Development of Unconstrained Heartbeat and Respiration Measurement System with Pneumatic Flow", *IEEE Trans. on Biomedical Circuits and Systems*, Vol. 6, No. 6, pp. 596–604, 2012.
- (19) K. Watanabe, T. Watanabe, H. Watanabe, H. Ando, T. Ishikawa, and K. Kobayashi: "Noninvasive Measurement of Heartbeat, Respiration, Snoring and Body Movements of a Subject in Bed via a Pneumatic Method", *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, Vol. 52, No. 12, pp. 2100–2107, 2005.
- (20) 渡辺春美, 渡辺嘉二郎: "睡眠中の心拍, 呼吸, イビキ, 体動および咳の無侵襲計測", *計測自動制御学会論文集*, Vol. 35, No. 8, pp. 1012–1019, 1999.
- (21) J. W. Cooley and J. W. Tukey: "An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series", *Mathematics of Computation*, Vol. 19, No. 90, pp. 297–301, 1965.
- (22) C. F. Gauss: "Nachlass: Theoria Interpolationis Methodo Nova Tractata", *Carl Friedrich Gauss Werke, Band 3, Koniglichen Gesellschaft der Wissenschaften, Gottingen*, pp. 265–327, 1866.
- (23) S. Guo, Y. Kato, H. Ito, and T. Mukai: "Development of Rubber-Based Flexible Sensor Sheet for Care-Related Apparatus", *Sumitomo Electric Industries Technical Review*, No. 75, pp. 125–131, 2012.