

複合センサを用いた高齢者向けベッドモニタリングシステムの改良

システムの現状と将来構想について

中正和久¹, 齋藤俊哉², 間所洋和², 下井信浩²¹ 大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻² 秋田県立大学システム科学技術学部機械知能システム学科

我々の研究グループでは、我が国で進行する高齢化の現状を踏まえ、介護向けベッドモニタリングシステムの研究開発を進めている。本研究では、安価な加速度センサとピエゾ荷重センサを組み合わせたセンシング技術と、機械学習による姿勢検知アルゴリズムを用いることにより、高精度・高 QOL・低価格な離床検知システムを実現している。本稿では、まず、離床検知システムの検知率および信頼性の向上のために行なった、ピエゾ荷重センサの改良と姿勢判定アルゴリズムの比較実装について報告する。本システムは、20代の被験者 10 名を対象とした実験において、離床行動に至る基本 7 姿勢の検知率 94.0% を達成した。次に、枕に内蔵したピエゾ荷重センサにより心拍や呼吸などの生体情報をモニタリングする手法の提案ならびに検証実験について報告する。20代の被験者 10 名を対象とした実験では、新たに開発したアルゴリズムを含む 3 種類の心拍抽出アルゴリズムを比較検証し、いずれのアルゴリズムにおいても 99.8% を超える精度で在床・離床判定が可能であることが実証された。

キーワード：ベッドモニタリング, 機械学習, 生体情報モニタリング, 離床検知, 加速度センサ, ピエゾセンサ

近年、我が国では高齢化が進行し、医療・介護施設における職員の過重労働が社会問題となっている。日本医療労働組合連合会（2016）によると、介護施設における夜勤形態は 2 交替夜勤の職場が 9 割近くを占めており、2 交替制の職場のうち、64.5% の勤務時間が 16 時間以上であると報告されている。このような過重労働環境下においては、介護職員による被介護者の見守り体制も手薄となり、それに起因するとみられる被介護者の転倒・ずり落ち・転落などのベッド周辺での事故も多数報告されている（三田寺ら、2013）。

このため、近年では被介護者の離床行動を早期に検知するために、離床センサを導入する介護施設が増加している。しかし、従来使用されてきた離床センサには、被介護者の身体的拘束を伴う、検知のタイミングが遅い、高価格である、などの課題が残存していた。このため、これらの課題の克服を目標と

して、我々は複合センサを用いた離床検知システムの構築について研究を進めている。本稿では、研究中の離床検知システムの検知率と信頼性向上のために行なったセンサの改良と機械学習アルゴリズムの比較実装について報告する。

また、ベッド上の被介護者の心拍や呼吸等の生体情報を、身体的拘束を伴うことなく計測し、睡眠・覚醒リズムの問題点を洗い出すことによって深夜徘徊等を予防するモニタリングシステムが実用化されている。このようなシステムで市販されているものは、ベッド胸部付近にシート状の圧力センサを敷き、動脈圧変動や呼吸動作などによって生じる微小振動を検出する仕組みとなっている。我々は、システムの可搬性や設置の容易さを向上しつつ、就寝時の危急の事態を早期検知することを目指して、枕内蔵型の生体情報モニタリングシステムの研究を進めている。本稿では、システムで実装されているアルゴリ

ズムおよびその実験結果，さらに枕を用いた見守り機器に関する将来構想について報告する。

離床検知システムとその改良

本研究では，被介護者の QOL，システムの低価格化，高い検知率等の要件を満たす介護向け離床検知システムの構築を目指し，加速度センサとピエゾ荷重センサを組み合わせた複合センサ方式と，機械学習による姿勢判定アルゴリズムを取り入れ，システムのブラッシュアップを進めている。

枕・ベッドセンサシステムの改良について

本システムでは，被介護者の QOL を損なわないように配慮し，枕内部に加速度センサを，ベッドフレームにピエゾ振動センサを設置して被介護者のベッド上での動きを検知する（図 1）。これらのセンサにより収集された信号は，ZigBee 無線モジュールを経由して集計サーバへ送信される。

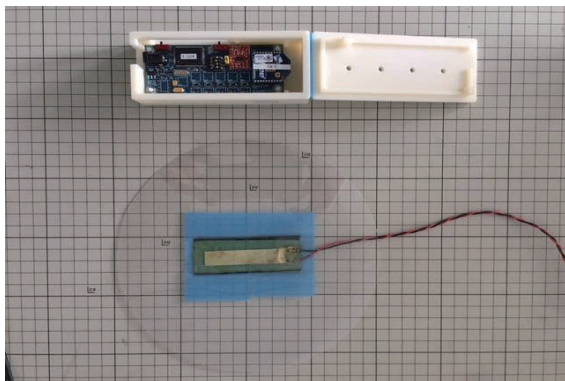


図 1 加速度センサ（上）とピエゾ荷重センサ（下）

ピエゾ振動センサは，耐久性と感度向上のため，ピエゾフィルムをウレタンシートで挟み込んだ構造となっている。さらに今回は，感知領域を拡大するため，直径 200mm，厚さ 0.5mm の PET 板に貼り付ける改良を施した。ピエゾフィルムは耐久性に優れ，常時電源を必要としないため，システムの運用コスト軽減に寄与している。本システムでは，ピエゾ振動センサをマットレスとベッドフレームの間に 5 箇所設置し，ベッド上での微小振動を収集している（図 2）。

枕内部に埋め込まれた加速度センサは，高齢者のベッド上での動作による振動情報を収集するとともに，危急時に枕を振ることによって外部に助けを求める緊急通報システムとして機能する。緊急通報システムは，枕の上で寝返りを打つなどの通常動作では反応しないように，枕を振った際に生じる特定の周波数振動が一定時間続いたときのみ作動するように，フーリエ変換を用いて実装されている。

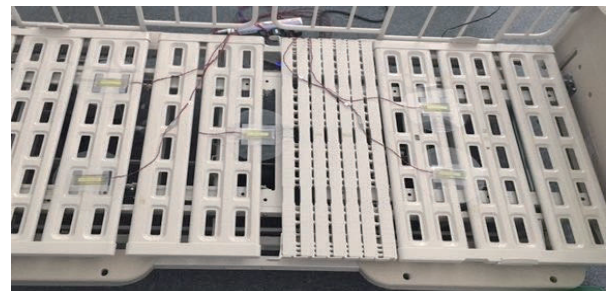


図 2 ベッドフレームに取り付けられたピエゾ振動センサ

被介護者が枕を振って緊急通報を行うと，電話・ショートメール（SMS）・Email 等の手段により家族や民生委員へ情報発信されるとともに，宅外に設置されたパトライトが点灯して近隣住民に危急を知らせることができる（図 3）。緊急通報システムの誤動作を防ぐために，通報が正常に行われたことを宅内ロボットから高齢者に通知する機能を追加することは今後の課題である。



図 3 パトライトによる緊急通報システム

姿勢判定アルゴリズムの比較検討

本システムでは，安価な加速度センサとピエゾ振

動センサの組み合わせによって高精度な離床検知システムを実現するために、機械学習を用いた姿勢判定アルゴリズムを搭載している。従来研究では、ニューラルネットワークの一種である対向伝搬ネットワーク (CPN) からなる機械学習アルゴリズムを用いて、枕・ベッドセンサから得られた信号を図4に示される基本7姿勢へ分類することにより、平均で78.6%の姿勢判定率を得るに至っている (間所ら, 2013)。

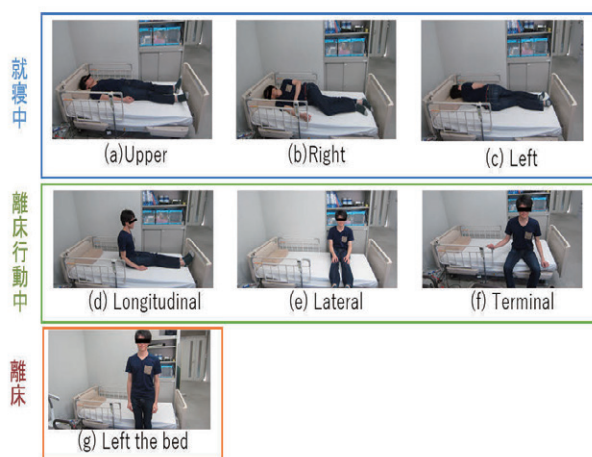


図4 離床検知プログラムによって分類される基本7姿勢

本研究では、従来の機械学習アルゴリズムの信頼性を検証するために、単純ベイズ (NB), k-近傍法 (k-NN), サポートベクタマシン (SVM), ランダムフォレスト (RF) による姿勢検知プログラムを実装し、被験者10名を対象に最適なアルゴリズムの比較検討を行った。実験では、被験者に基本7姿勢を20秒間隔で切り替えてもらい、計5回のセンサ計測を実施している。解析の結果、従来研究してきた対向伝搬ネットワーク (CPN) によって、最も高い検知率が得られることが実証された。特に、離床予測において重要となる長座位 (図4-(d)) および端座位 (図4-(f)) の検知率についても、CPNによる判定が有利であることも検証された。各種アルゴリズムの姿勢検知率の比較結果を表1に示す。

今後の研究課題としては、被験者がベッド上でランダムに姿勢を変えたときに得られる時系列信号から、姿勢判定を行う機械学習アルゴリズムを開発す

ることが挙げられる。

表1 姿勢分類アルゴリズムの検知率比較 [%]

	臥位	長座位	短座位	端座位	離床	平均
NB	93.0	49.3	93.8	83.5	11.7	66.3
k-NN	92.9	84.1	94.8	91.2	89.1	90.4
SVM(rbf)	79.0	40.7	83.3	73.8	90.0	73.4
SVM(linear)	77.1	56.3	87.6	78.1	94.8	78.8
RF	94.6	85.9	96.2	91.9	85.7	90.9
CPN	95.0	95.0	98.3	96.7	85.0	94.0

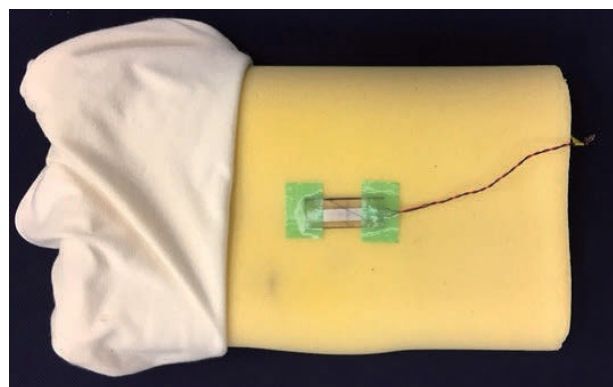
枕内蔵ピエゾセンサによる生体情報モニタリング

被介護者の QOL を損なわずに就寝時の危急の事態を早期検知するには、心拍や呼吸などの生体情報を非拘束センサによって常時計測することが求められる。我々は、システムの可搬性や設置の容易さを考慮し、枕内蔵型の生体情報モニタリングシステムの開発を進めている。

生体情報モニタリングシステムの概要

本システムは、枕本体上側中央部に粘着テープで貼付されたピエゾ荷重センサ (図1) によって計測される微小振動から、被験者の心拍や呼吸等の生体情報を推計する。ピエゾ荷重センサは、市販のピエゾフィルム (DT2-028K/L) を、厚さ1mmのウレタンシートで挟み込んで接着することにより製作している。また、計測にはHIOKI社製メモリハイロガー8430を用い、サンプリング周波数100Hzで記録する。

図5 枕に取り付けられたピエゾセンサ



心拍波形の抽出アルゴリズム

ピエゾ荷重センサの電圧信号からノイズ除去後に心拍波形を抽出し、在床・離床状態の判定を行った。ノイズ除去には遮断周波数 10Hz のローパスフィルタ (Butterworth) を用いた。心拍波形の抽出には、比較的消費電力が少なく実装が容易な 3 種類のアルゴリズム (短時間変動量, Slope Sum Function, 短時間エネルギー量) を比較実装した。これらのアルゴリズムは、時間方向のスケールを変更することにより呼吸波形を抽出することも可能である。3 種類のアルゴリズムの詳細については、(Nakasho ら, 2016 ; Zong ら, 2003 ; Lydon ら, 2015) を参照されたい。図 6 は、ピエゾ荷重センサにより計測された信号から高周波ノイズを除去した波形 (a)、および 3 種類のアルゴリズムにより抽出された心拍波形 (b) (c) (d) である。

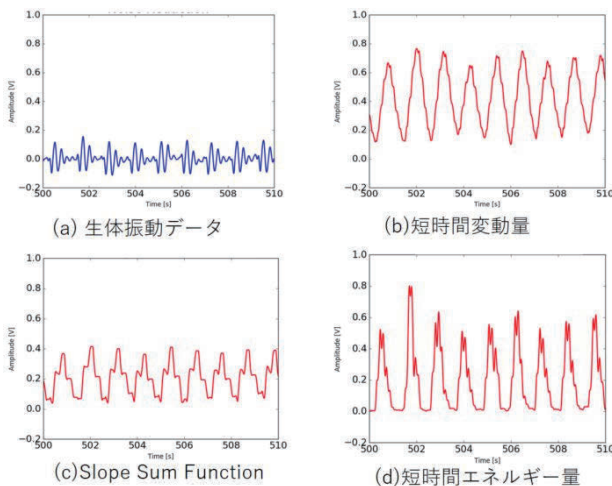


図 6 枕内蔵ピエゾ荷重センサによって得られる生体振動とアルゴリズム適用後の心拍波形

在床・離床状態の判定実験

枕内蔵型の生体情報モニタリングシステムが、被験者の在床・離床状態を判別可能であるかを検証するために、20 代の被験者 10 名に対して実験を行った。実験では、被験者に枕の上で 10 分間仰向けに安静にもらい、ピエゾ荷重センサとデータロガーによる計測を実施した。在床・離床状態は、心拍波形の 10 秒間の変動量が閾値を超えるか否かによって判定した。この結果、全ての被験者・アルゴリズムで 99.8% を超える精度で在床・離床状態の判定が

可能であることが実証された。今後の課題としては、被験者の姿勢変化に対するロバスト性、長期モニタリングにおける信頼性の検証などが挙げられる。

結言

本稿では、加速度センサとピエゾ荷重センサを用いたベッドモニタリングシステムの最新の研究成果について報告したが、システムの普及にはさらなる低価格化と可搬性の実現が課題となる。我々は、これらの課題を解決する将来構想として、無線ネットワークに常時接続された枕型簡易ロボットに、緊急通報システム、生体情報モニタリング、呼びかけ機能などを実装することを検討している。

文献

- 日本医療労働組合連合会 (2016). 「2015 年介護施設夜勤実態調査結果」『医療労働』587 号, 10-31.
- 三田寺裕治, 赤澤宏平 (2013). 「介護保険施設における介護事故の発生状況に関する分析」『社会医学研究』30 (2), 123-130.
- 間所洋和, 下井信浩, 佐藤和人 (2013). 「圧電素子を用いた非拘束センサシステムによる離床行動予測」『日本機械学会論文集』79 (800), 1024-1035.
- Kazuhisa N., Madokoro H., and Shimoi N. (2016). Implementation of a vital signs monitoring system in combination with a bed-leaving detection system. In 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2016), 290-295.
- Zong, W., Heldt, T., Moody, G. B., and Mark, R. G. (2003). An open-source algorithm to detect onset of arterial blood pressure pulses. In Computers in Cardiology, 2003, 259-262.
- Lydon, K., Su, B. Y., Rosales, L., Enayati, M., Ho, K. C., Rantz, M., and Skubic, M. (2015). Robust heartbeat detection from in-home ballistocardiogram signals of older adults using a bed sensor. In Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2015 37th Annual International Conference of the IEEE, 7175-7179.

〔平成 29 年 6 月 30 日受付〕
〔平成 29 年 7 月 11 日受理〕

Improvement of bed monitoring system for aged people using composite sensors On the current research results and the future plan

Kazuhisa Nakasho¹, Shunya Saito¹, Hirokazu Madokoro¹, Nobuhiro Shimoi¹

¹ *Department of Machine Intelligence and Systems Engineering, Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University*

In reaction to the rapidly aging society in Japan, our research group is promoting the research and development of bed monitoring system for nursing care. In this work, we have created a high-accuracy, high QOL, inexpensive bed monitoring system that uses sensing technology, combining an inexpensive acceleration sensor and piezo load sensor and machine learning algorithm for posture detection. In this paper, first, we report on improvement of piezo load sensor and comparison of posture detection algorithm. This research has lead our system to achieve a judgement rate of 94.0% in distinguishing the seven basic postures in the bed-leaving motion in an experiment involving ten subjects. Next, we report on the proposal and experimental results of a method to monitor vital signs with a piezo load sensor built in a pillow. We compared three heart beat detection algorithms, and verified they can distinguish the states of staying in bed and leaving bed with accuracy rate of over 99.8%.

Keywords: Bed monitoring, Machine learning, Vital signs monitoring, Bed-leaving detection, Acceleration sensor, Piezoelectric sensor