

マイクロ波センサを用いたベッド上の姿勢推定と

呼吸数計測に関する研究

中村 敬*

A Study of Posture Estimation and Respiratory Rate Measurement on Bed Using Microwave Sensor

Kei NAKAMURA

In this study, an integrated system using microwave, thermopile array, and Time-of-Flight (ToF) sensors was investigated for posture estimation and respiratory rate measurement, aiming to reduce the burden of monitoring tasks in care facilities. As a result, sitting and absence were correctly identified, but all lying postures were misclassified as sitting. This suggests that dependence on image-based features and insufficient training data were contributing factors to the accuracy degradation. In contrast, in respiratory rate measurement, although the signal amplitude in the prone position attenuated to approximately half that of the supine position, FFT analysis enabled accurate calculation of respiratory rates matching the set value across all postures.

Keywords: Microwave Sensor, Posture Estimation, Respiratory Rate Measurement, Sensor Fusion, LSTM

1. はじめに

近年、介護施設における介護職員不足は、極めて深刻な課題となっている。厚生労働省の調査によれば、2023年度の介護職員数は212.6万人と初めて前年度を下回った。一方で、必要とされる介護職員数は2026年度に約240万人、2040年度には約272万人に達すると推計されており、この需要と供給の乖離は、今後、さらに拡大する見通しである。こうした背景から、IoT (Internet of Things) を活用したセンサやロボットを導入し、介護業務の効率化と被介護者の安全性の向上を図る取り組みが進められている。なかでも、見守り機器は、夜間など職員が少ない時間帯における監視体制を補完し、巡回や確認業務の負担を軽減できる点から、介護施設において注目されている。

既存の見守り機器の多くは、各種センサやカメラを利用者の居室やトイレなどに設置し、室内に

おける利用者の状態を可視化することを目的としている。しかし、従来の単一センサでは利用者の状態認識の精度に限界がある。この課題に対して、可視光カメラ¹⁾、サーモパイルアレイセンサ^{2,3)}、ToF (Time-of-Flight) センサ^{4,6)}、および圧力分布センサ^{7,8)}など、様々な技術の導入が試みられている。しかしながら、いずれの方式においても利用者のプライバシーへの配慮は十分ではなく、より非侵襲な計測手段が求められている。

こうした課題を解決する技術として、マイクロ波センサの活用が注目されている。マイクロ波センサは、電波の反射を利用して物体の動きや微細な振動を検知するため、カメラのようなプライバシー上の懸念がなく、壁面や天井に設置すれば、居室全体の中での動きをシームレスにとらえることが可能となる。また、呼吸や心拍といったバイタル情報の非接触計測も期待されている。バイタルデータを継続的かつ非侵襲的に取得できれば、利用者の健康状態の早期把握や異常検知への精度

* 電子機械研究課

向上が見込まれる。一方で、介護現場への実用化に向けては、ベッド上での姿勢推定への適用可能性や呼吸計測の精度についてさらなる検討が必要である。

そこで本研究では、マイクロ波センサの介護見守りへの適用可能性を検討することを目的とし、被介護者のベッド上での姿勢推定と呼吸数の計測を行った。姿勢推定については、これまで実施したサーモパイルセンサおよび ToF センサ⁹⁾にマイクロ波センサを組み合わせることで、各センサの特性を相互に補完し、識別精度の向上を図った。呼吸数計測においては、マイクロ波センサを用いてベッド上の安静状態における計測の可否について検討した。

2. 実験方法

2.1 使用するセンサ

本研究では、サーモパイルアレイセンサ（SSC 社、SSV32x32-01-11）、ToF センサ（Arducam 社、

B0410）およびマイクロ波センサ（新日本無線社、NJR4178J）を使用した。各センサの外観を Fig.1 に示す。

サーモパイルアレイセンサは、物体から放射される赤外線を検出することで、接触することなく温度分布を計測するセンサである。本センサは、複数の熱電対を直列接続したサーモパイル素子を 2 次元状に配列することで、視野内の温度分布を画像として取得でき、 32×32 の素子配列を有し、視野角は $90^\circ \times 90^\circ$ である。

ToF センサは、光源から照射した近赤外光が対象物に反射して戻るまでの時間を計測することで、センサから対象物までの距離を取得できる。各画素において距離情報を取得することで、視野内の 3 次元形状を深度画像として出力する。本センサの解像度は 240×180 画素、視野角は対角 70° であり、光源には 940 nm の垂直共振器型面発光レーザーを使用し、外部光源なしで使用可能である。

マイクロ波センサは、マイクロ波帯の電波を照射し、対象物からの反射波を受信することで、物体の動きや微細な変位を検知するセンサである。送受信した電波の位相差および周波数変化（ドップラー効果）を解析することで、対象物の微細な変位を捉えることができる。本センサは X バンド（ 10.525 GHz ）のドップラーモジュールであり、ビーム半値幅は E 面 36° 、H 面 72° である。

2.2 姿勢推定

サーモパイルアレイセンサ、ToF センサおよびマイクロ波センサを用いてベッド上の姿勢の推定

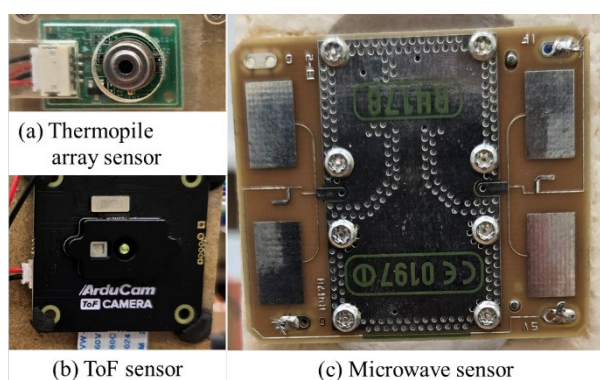


Fig.1 Sensors appearance.

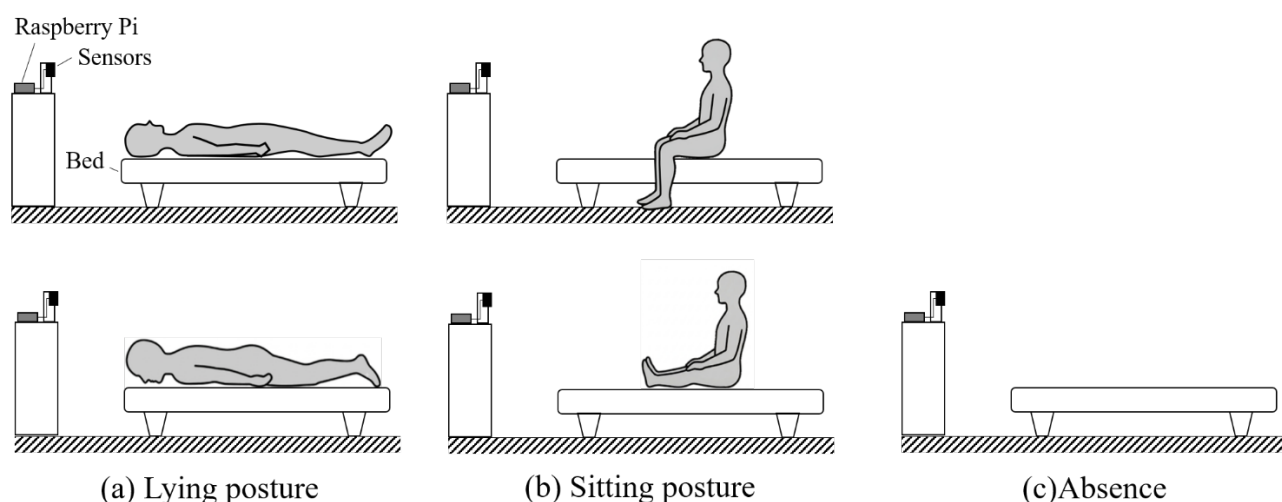


Fig.2 Experimental setups and subject postures.

を行うシステムの構成を Fig.2 に示す．各センサはベッド横に設置したシングルボードコンピュータ（Raspberry Pi）に接続されており，被験者の全身を俯瞰して捉えられるように配置した．推定する姿勢は，臥位（Lying），座位（Sitting），不在（Absence）の 3 クラスとした．サンプリングレートについては，サーモパイルアレイセンサおよび ToF センサを 1 Hz，マイクロ波センサを 100 Hz とした．

各センサから得られたデータの特徴量抽出および統合方法の手順を以下に示す．まず，サーモパイルアレイセンサおよび ToF センサの出力画像を 64×64 ピクセルに変換し，それぞれ独立した畳み込みニューラルネットワーク（CNN）に入力した．ここでは，TimeDistributed レイヤーを用いることで画像ごとの空間的な特徴に加え，時系列方向の変化を考慮した特徴を抽出し¹⁰⁾，各センサから 64 個，計 128 個の特徴量を抽出した．次に，マイクロ波センサの出力に対しては，1 秒間ごとに信号の統計的性質を示す平均値，標準偏差，RMS に加え，個人差や距離による振幅変動を補正するための Z スコア，姿勢遷移に伴う突発的な動きを鋭敏に捉える差分エネルギー，および特定の周波数帯域を評価するバンドパワーの 6 つを特徴量とした．これら 3 センサから得られた合計 134 個の特徴量を特徴量ベクトルとして，LSTM（Long short-term memory）¹¹⁾に入力することで姿勢の推定を行った．

モデルの学習には，臥位 177 サンプル，座位 237 サンプル，不在 133 サンプルを用いた．学習条件として，エポック数を 50，学習率を 0.001 に設定した．

2.3 呼吸数の計測

マイクロ波センサ単体を用いてベッド上の静止状態における呼吸数の計測が可能かを検討した．システムの構成は姿勢推定と同様とし，計測は仰臥位（Supine），横臥位（Lateral），腹臥位（Prone）の 3 姿勢を対象とした．被験者はベッド上で静止し，メトロノームを用いて 1 分間に 15 回呼吸を行った．測定は 30 秒間の待機時間を設けた後，2 分間の静止状態での計測を各姿勢 4 回ずつ行った．

信号処理の手順を以下に示す．マイクロ波センサの出力信号には，呼吸成分のほかに微細な体動や環境ノイズなどが含まれるため，まずバンドパスフィルタを適用して呼吸成分を抽出した．一般に安静時の呼吸数は，毎分 12～20 回程度であり，周波数に換算すると約 0.2～0.33 Hz に相当する．ここでは，個人差や呼吸の乱れを考慮し，通過帯域を 0.1～1 Hz に設定したバンドパスフィルタを用いることで，呼吸に対応する周波数成分を抽出した．次に，得られた波形データに対して高速フーリエ変換（FFT）を適用し，スペクトルのピーク周波数から呼吸数を算出した．

3. 結果と考察

3.1 姿勢推定

座位，臥位，不在の動作を切り替えながら，合計 600 秒間継続して姿勢を変化させたときの姿勢推定の時系列変化を Fig.3 に，各クラスの再現率（Recall），適合率（Precision），F 値（F1-score）を Table 1 に示す．Fig.3 より，臥位を正しく分類できず，その多くが座位として誤分類される傾向があった．この要因として，本モデルがマイクロ波センサから得られる特徴量よりも，画像系センサから得られる特徴量を過学習，あるいは優先的に処

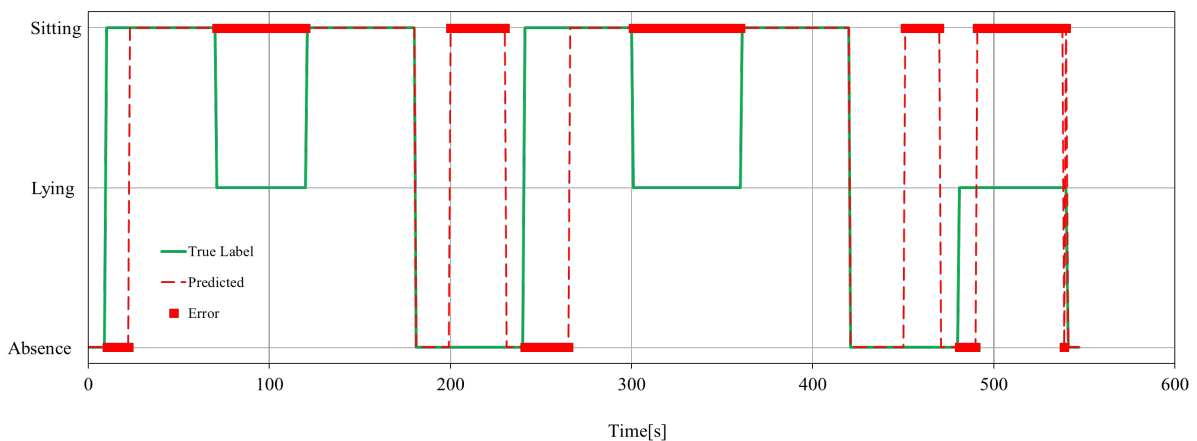


Fig.3 Time-series changes in ground truth and predicted postures.

Table 1 Recall, Precision, and F1-score for each class.

Posture	Recall	Precision	F1-score
Lying	0.00	0.00	0.00
Sitting	0.86	0.47	0.61
Absence	0.52	0.60	0.56

Note: Recall measures the ability to find all positive instances; Precision indicates the accuracy of positive predictions; and F1-score is the harmonic mean of both metrics.

理した可能性が考えられる．ここで過学習とは，学習データの特定のパターンや偏りにモデルが過剰に適合し，未知のデータに対する汎化性能が低下する現象である．本来，マイクロ波センサが捉える遷移時の信号変化は姿勢変化を特定する重要な指標となるが，現在の学習モデルにおいては，臥位と座位の画像的類似性，あるいは学習データ数の不足により，これらの特徴が有効に活用されなかったことが精度低下を招いたと推察される．また，不在から他の姿勢への遷移時にタイムラグが生じる場合がある．これは，時系列モデルが過去の状態（隠れ状態）を保持する慣性が働き，新たな状態の変化に適応するまでに時間を要したためと考えられる．

3.2 呼吸数の計測

各姿勢で計測した信号に対し，バンドパスフィルタを適用した結果を Fig.4 および Table 2 に示す．Fig.4 より，仰臥位では胸部の上下運動が直接作用するため，最も高い振幅が得られた．一方で，横臥位，腹臥位と姿勢が変化するにつれて振幅は減衰し，腹臥位における振幅は仰臥位の半分程度となった．このように姿勢による振幅の差はあるものの，いずれの姿勢においても設定した呼吸数（15 回/分，2.3 節参照）に対応する周期的な変動が確認された．

フィルタ処理された信号を FFT 処理により周波数領域で解析を行った結果を Fig.5 および Table 3 に示す．Fig.5 より，すべての姿勢で設定値と一致する 0.25 Hz 付近にピークが確認され，呼吸数の計測が可能であることが示された．また，0.5 Hz 付近でピークが確認されたのは，一周期における呼気・吸気に伴う体動の切り替わりを独立して捉えたことによるものと考えられる．

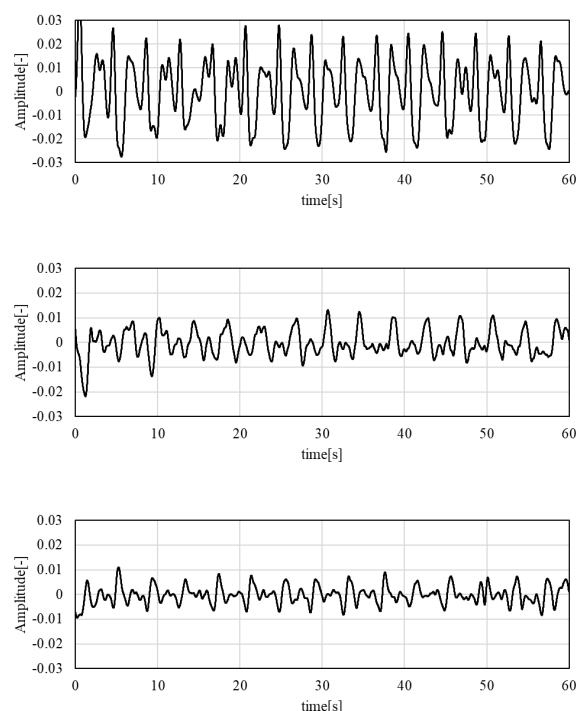


Fig.4 Filtered waveforms for each posture . (Top: Supine, Middle: Lateral, Bottom: Prone)

Table 2 Results of filtered waveforms for each posture.

Posture	Max (SE)	Min (SE)	Range
Supine	0.0205 (0.00632)	-0.0195 (0.00321)	0.04
Lateral	0.0169 (0.00417)	-0.0180 (0.00274)	0.0349
Prone	0.0134 (0.00266)	-0.0072 (0.00066)	0.0206

4. まとめ

マイクロ波センサを用いて，姿勢推定および呼吸数の計測を行った結果，以下の知見が得られた．

- ・座位，不在の推定は可能であったが，臥位については推定できなかった．
- ・呼吸に伴う信号振幅は仰臥位で最大となり，腹臥位では胸腹部の動きがベッド側に拘束されるため，振幅は半分程度まで減衰した．
- ・姿勢による振幅の強弱に関わらず，FFT を用いることで，すべての姿勢において設定値（15 回/分）と一致する呼吸数を高精度に抽出できることを確認した．

本研究によりマイクロ波センサの介護見守り

への有用性が確認されたものの、特定の姿勢(臥位)における識別性能の補完が依然として必要である。今後は、学習データの拡充およびセンサ間の統合プロセスの見直しにより、各センサの特性を活かした高精度な介護見守りシステムの構築を目指す。

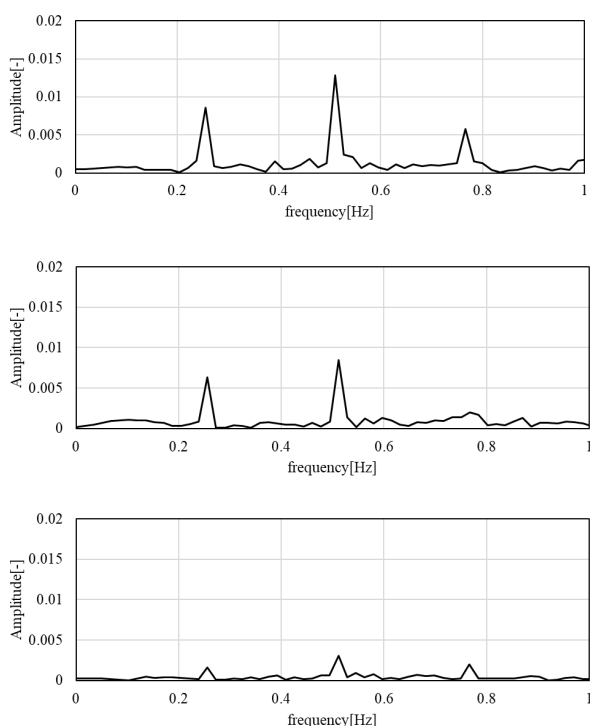


Fig.5 Frequency spectra for each posture. (Top: Supine, Middle: Lateral, Bottom: Prone)

Table 3 Mean peak frequency and converted respiratory rate (BPM) for each posture.

Posture	Mean Peak Frequency (SE) [Hz]	Respiratory Rate (SE) [breaths/min.]
Supine	0.254 (0.00036)	15.24 (0.0216)
Lateral	0.256 (0.00027)	15.36 (0.0162)
Prone	0.252 (0.00085)	15.12 (0.0507)

参考文献

- 1) 青木義満：“視覚センサによる見守り技術について”. 電子情報通信学会 通信ソサイエティ マガジン, 11(1), p30-38 (2017)

- 2) 九鬼正人, 中嶋 宏, 土屋直樹, 田中純一, 畑 豊：“サーモパイルアレイセンサを用いた屋内用の人モニタリングシステム”. システム制御情報学会論文誌, 27(4), p149-159 (2014)
- 3) 関 弘和：“温度センサアレイを用いた浴室異常検出システム”. ライフサポート, 31(4), p144-150 (2019)
- 4) 真田 慎, 岡田志麻：“Kinect を用いた離床認識システムの開発”. 看護理工学会誌, 3(2), p73-85 (2016)
- 5) 高橋裕基, 中島翔太, 北園優希：“Kinect センサによる深夜徘徊防止システムの開発”. 産業応用工学会全国大会講演論文集 2013, p42-43 (2013)
- 6) 石井雅樹：“3 次元画像処理による離床・転倒検知システムの開発”. 秋田県立大学ウェブジャーナル A, 9, p8-12 (2021)
- 7) 関根智仁, 熊木大介, 時任静士：“強誘電性高分子を用いた圧力センサのヘルスケア応用”. 日本写真学会誌, 82(1), p10-12 (2019)
- 8) 藤岡 潤, 宅間 陸, 川除佳和, 宮下大輔：“導電性編物による体圧分布測数布を用いた就寝姿勢モニタリングシステムの開発と評価”. 日本機械学会論文集, 86(892), 20-00199 (2020)
- 9) 中村 敬, 谷澤之彦：“画像分類を活用した被介護者の見守りシステムの検討”. 三重県工業研究所研究報告, 48, p1-5 (2014)
- 10) J. Donahue, L. A. Hendricks, S. Guadarrama, M. Rohrbach, S. Venugopalan, K. Saenko, T. Darrell：“Long-term recurrent convolutional networks for visual recognition and description”. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), p2625-2634 (2015)
- 11) S. Hochreiter, J. Schmidhuber：“Long short-term memory”. Neural Computation, 9(8), p1735-1780 (1997)

(本研究は、法人県民税の超過課税を財源としております。)