

呼吸活動での胸郭運動計測の試み

伊藤敏^{*1}, 井上祥史^{*2} 鷺野嘉映^{*3}

*1 岐阜聖徳学園大学 *2 岩手大学 *3 愛知みずほ短期大学

Attempt to measure thoracic cage movement in respiratory activity

Itou Satoshi^{*1}, Inoue Shoshi^{*2} and Washino Kaei^{*3}

*1 Gifu Shotoku Gakuen University, *2 Iwate University *3 Aichi Mizuho Junior College

The proportion of elderly people in the total population is increasing in Japan, and maintaining and promoting the health of the elderly is an important issue. The elderly person are characterized by sympathetic dominance in autonomic nervous system responses. Breathing exercises have been reported to be useful in regulating the autonomic nervous system. In this study, we propose methods that use depth information from a depth camera and the changes of flexion sensors as a way to understand the areas used for respiratory activity.

キーワード: 胸郭運動の計測, 呼吸, 曲げセンサ, 深度カメラ

1. はじめに

我が国の高齢者の総人口に占める割合は 2015 年で 26.7%を超えており⁽¹⁾, 平均寿命は女性で 87 歳, 男性で 81 歳を超え(2021)⁽²⁾, 高齢者の健康保持増進は重要な課題である. 高齢者の特徴として, 自律神経系の反応においては交感神経が優位である⁽³⁾. 自律神経系の調整には呼吸法が有用であることが報告されている⁽⁴⁾. 高齢者の呼吸法においては, 胸式呼吸より腹式呼吸が効率的である⁽⁵⁾. 腹式呼吸は, 横隔膜を意識的に大きく動かす呼吸である. 横隔膜は肺の下にある筋肉で, その周辺には神経組織が集まっているため, 横隔膜の動きを介して副交感神経が刺激を受けることで自律神経が調整される⁽⁶⁾. 高齢者の意識的腹式呼吸中には副交感神経が優位になり, リラクゼーション効果をもたらす, ストレスホルモンの分泌が抑制されることが報告されている⁽³⁾. よって, 高齢者においては, 自らの呼吸の状態を把握し, 日常的に腹式呼吸を意識的に行うことが重要であると考えられる.

本報告では, 胸郭部のどの部分を利用して呼吸活動をしているかを客観的に把握する方法をいくつか提案

する. 呼吸を簡易的に非侵襲的に把握する方法として, 曲げセンサおよび depth カメラの深度情報から胸郭部の変動を検出する方法について比較検討した.

本稿では, 2 章で呼吸検出の方法として曲げセンサおよび depth カメラからの深度情報より胸郭の動きを推定する方法を記述し, 3 章で適応例として, 立位での呼吸行動検出を試み, 4 章でまとめる.

2. 呼吸検出方法

人は呼吸をするために, 外肋間筋と横隔膜を収縮・弛緩させている. これらの収縮により胸郭や腹腔は前にせり出し, 吸気時には元に戻る. すなわち, 呼吸活動により胸郭や腹部に物理的動きが生じる.

呼吸活動に伴う胸郭の変動について考察する. 一回換気量 (tidal volume) とは一回の呼吸運動 (呼気と吸気) で気道・肺に出入りするガスの量のことを指す. 単位は mL で表現している. 成人の安静時における一回換気量は「理想体重×6[mL/kg]」で算出する. 理想体重は次式で計算可能である⁽⁷⁾.

$$\text{男性[kg]} = 50 + 0.91 \times (\text{身長[cm]} - 152.4)$$

$$\text{女性[kg]} = 45.5 + 0.91 \times (\text{身長[cm]} - 152.4)$$

これらの式より、一回換気量は 250 から 450mL 程度である。胸郭内部の体積は肺活量程度と考えると 4000mL から 5000mL 程度と推定される。呼吸に寄与する胸郭部を円筒と仮定する。さらに、円筒の高さを変動しないと仮定すると、呼吸に伴う変動は円筒の半径の変動として観察される。

一回換気量は胸郭体積の 10%程度と推定される。故に半径の変動は 3%程度と思われる。胸囲が 90cm 程度と仮定すると、曲率半径の変動は $\pm 0.4\text{cm}$ 程度となる。

この呼吸に伴う胸郭部の膨張・収縮の動きを、計測するには直接胸郭部に接触させて変動を計る方法と胸郭部の変動を非接触でとらえる方法に大別される。本報告では曲げセンサによる方法を提案する。非接触では depth カメラによる深度情報からの方法を提案する。一連の動きは擬周期的に変動すると考えられる。これらの方法を用いて呼吸状態を同時計測して両方法の違いを検討する。なお、今回は呼気吸気量の計測および推定は行わない。

2.1 曲げセンサによる方法

曲げセンサは、一方向の曲げ程度により抵抗値が変化する Bending Detection Sensor (TAIWAN ALPHA ELECTRONIC CO., LTD 製)を用いた⁽⁸⁾。用いた曲げセンサの抵抗値はフラットなとき 25k Ω 程度、強く曲げられたとき 180k Ω 程度に変化する。

図 1 に示すように、曲げセンサの両端にフラットな板を貼り、「曲げ」が「曲げセンサ」の一部だけに集中する構造にする。曲率半径の変化を曲げセンサの角度変化として計測する。曲げセンサの抵抗値検出は抵抗による分圧法で行い、曲率半径が増加する場合、すなわち胸郭部が膨張（吸気時に相当）する場合に計測値が上昇する様に設定をした。

作成した装置を図 2 に示す。センサから得られたデータをマイクロプロセッサで処理をして SD カードへ時間とともに記録した。サンプリング周波数は 50Hz とした。装置はセンサ部のサイズ 120 \times 10 \times 2mm、抵抗値検出記録部が 55 \times 55 \times 25mm で構成され、電池で作動する。SD カードに保存されたデータは、雑音除去のため PC で 1.0Hz のローパスフィルタを掛け、解

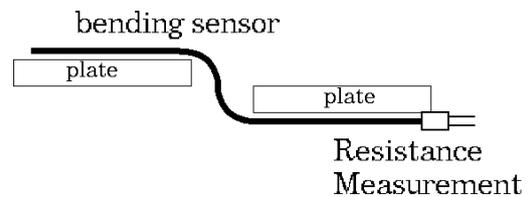


図 1 曲げセンサの形状

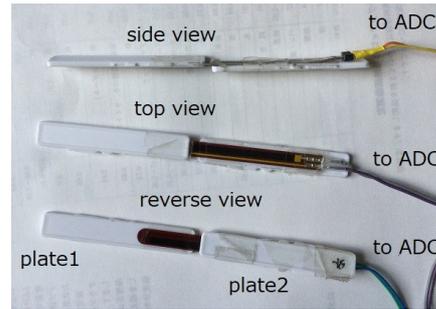


図 2. 曲げセンサ装置の写真

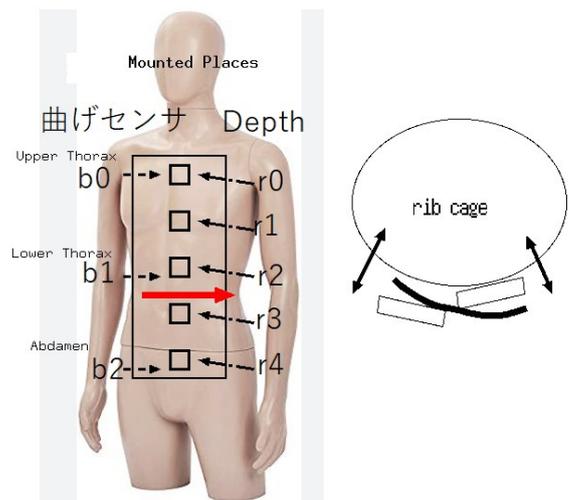


図 3 装置装着場所 b0, b1, b2 と曲げセンサ配置および深度情報取得場所 r0 ~r4 慣性センサの y 軸方向（赤矢印）

析に供された。

曲げセンサを胸郭部に配置した様子を図 3 に示す。胸郭上部（第 3 肋骨付近）b0、胸郭下部（第 10 肋骨付近）b1、腹部下部（へそのやや下）b2 の 3 カ所に配置し、それぞれを b0, b1, b2 と名付けた。

呼吸検出に実績を持つ慣性センサを胸郭下部に配置し、同時計測を行うことで検証をした。曲げセンサおよび慣性センサは加圧シャツに縫付けて実験に用いた。

2.2 深度カメラによる方法

呼吸に伴う胸部部の膨張・収縮の動きを、胸部部を撮影した深度カメラの深度情報の変化として記録する。一連の動きは擬周期的に変動すると考えられる。

深度カメラは Intel RealSense Depth Camera D415 を用いた。Depth 計測の画角は 70° である。D415 カメラは中央に RGB カメラ、その両脇に depth カメラを持ち視差から深度を求める方式である (図 4)。各 pixel の RGB カメラからの色情報と depth カメラからの深度情報の画角合わせはソフトウェアで行った。深度情報取得処理などは Intel Realsense SDK を用いた⁹⁾。なお、深度情報の精度は 2%とされている。

撮影は図 4 に示すような配置で、距離約 800mm で撮影領域に胸部部を含み、15fps、解像度 424×240 で行った。深度情報から体の肋骨上部から下腹部までに該当する領域、横幅 100pixels 縦 150pixels、を取り出した (図 4 の右図)。これを”解析領域”とする。解析領域の中央線上に図 3 で示した 5 領域の値を抽出し、r0, r1, r2, r3, r4 とした。5 領域は、それぞれ胸部最上部 r0, 上中部 r1, 胸部中央部 r2, 胸部下部 r3, 腹部下部 r4 に相当する。抽出した 5 領域は、それぞれ 11×11pixels の 121pixels の平均値とし、解析領域(100×150)の最大値 d_max と最小値 d_min を基準に、次式より 0 から 1 の間に d_normal として規格化した。

$$d_normal = (d_max - d) / (d_max - d_min)$$

d: 実験より得た値

この規格化により、実験中の体の前後の揺れがもたらす変動を補正し、かつ胸部部が膨張 (吸気時に相当) したときに値が増え、縮小 (呼気時に相当) したときに値が減る様にした。

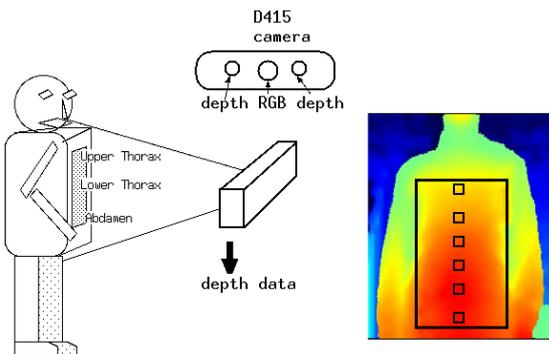


図 4. Depth カメラ撮影範囲 (左) と深度イメージ (右)

実験は Realsense SDK の録画機能を用いて ROS 形式の bag ファイルとして保存され、その bag ファイルより取り出されたデータは、雑音除去のため PC で 0.5Hz のローパスフィルタを掛け、解析に供された。

実験時には上半身に密着したシャツを着て行った。また曲げセンサとの同時計測時にはアンダーシャツの上にワイシャツを着て、その上から加圧シャツを着て行った。

3. 適応例 評価実験

提案手法で呼吸検出を評価した。曲げセンサ装置を加圧シャツに縫い付けて上からベルトで体前面に装着し計測を行った。同時に depth カメラで体の前面より録画した。呼吸計測が可能であるかの検証に慣性センサ¹⁰⁾と同時計測し比較検討をした。慣性センサは胸部下部の曲げセンサ b1 の位置 (図 3 参照) に慣性セン

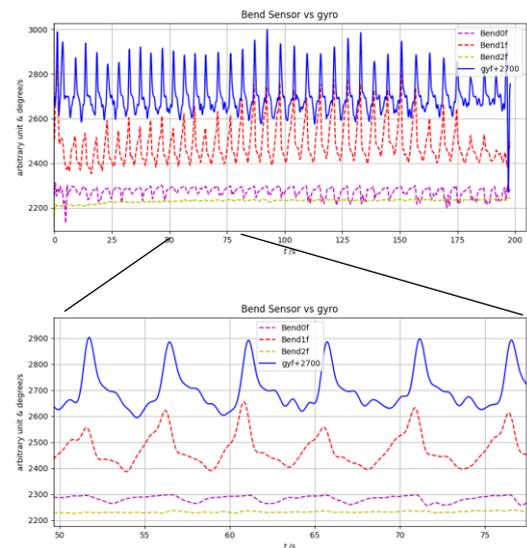


図 5. 腹式呼吸 曲げセンサ (破線) と y 軸周りの角速度 (青の実線) 下図は拡大図

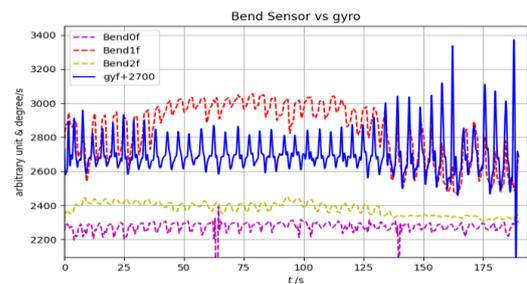


図 6. 胸式呼吸 曲げセンサ (破線) と y 軸周りの角速度 (青の実線)

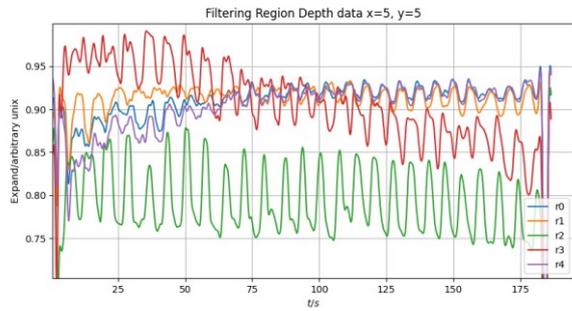


図 7. 腹式呼吸 depth カメラによる胸部各部位の深度

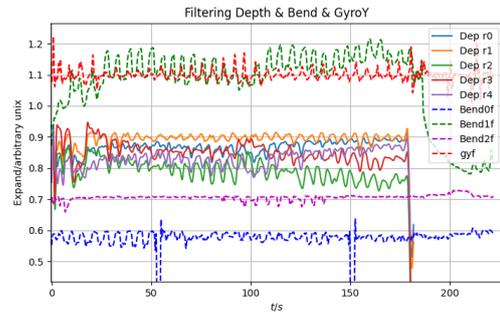


図 9. 胸式呼吸 深度と曲げセンサと角速度

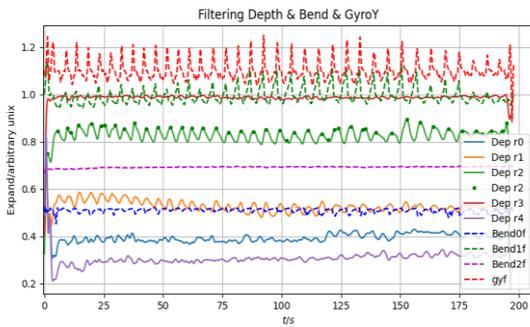


図 8. 腹式呼吸 深度 (実線) と曲げセンサ (破線) と角速度 (破線赤)

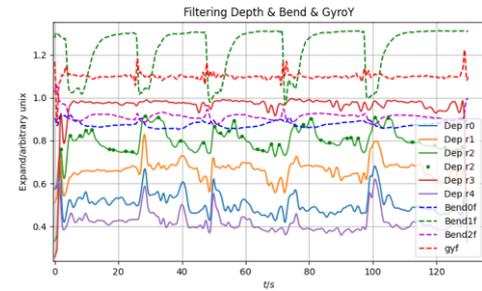


図 10. 深呼吸 5 回 角速度(赤破線), 曲げセンサ(破線), 深度(実線)

サ y 軸正方向が水平で体表面に密着し、左へ向かう方法へ装着した(図 3 の赤矢印)。

立位での腹式呼吸時の曲げセンサと慣性センサからの角速度の時間変化を図 5 に示す。左右の肋骨を結んだ線に平行な軸の角速度は呼吸を表すことが解っている⁽¹⁰⁾。角速度と胸部下部に装着した曲げセンサの変動は完全に同期しており、曲げセンサは呼吸に伴う胸部の変動を検出できている事を示す。胸部上部に着けた曲げセンサ b0 の変動幅は小さいものの胸部下部 b1 の動きと一致している。一方で下腹部に着けた曲げセンサ b2 の変動は解析に供することが出来ないくらい小さい。

図 6 に立位での胸式呼吸をした場合を示す。3 カ所に着けられた曲げセンサの変動は胸式呼吸と腹式呼吸では変動の仕方が変化し、腹部中央の b1 の変動幅は小さくなり胸部上部の b0 の変動幅が増す。これは胸式呼吸、腹式呼吸を本方法で区別可能であることを示唆している。

立位での腹式呼吸時の胸部部位の深度カメラによる時間変化を図 7 に示す。胸部の全領域で呼吸に伴う変

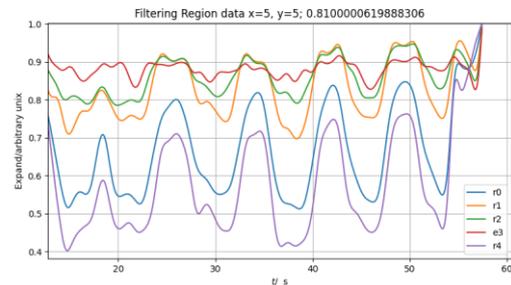


図 11. 深呼吸 5 回 深度 (実線)

動が見られる。実験では呼吸回数 26 回を行ったが、領域 r1 (橙色実線), r2 (緑色実線) では明確に 26 回の繰り返しが見られ、深度情報から呼吸に伴う胸部の変動をとってとらえることが可能であることを示している。図 8 に深度と共に曲げセンサ、慣性センサからの角速度を同時計測した結果をグラフ化したものを示す。それぞれの変動が一致している。胸式呼吸をした場合にも同様に呼吸回数 32 回に対し 32 の変動の繰り返しが見られた。図 9 に胸式呼吸の場合の図を示す。変動領域が胸部上部で見られる。

深呼吸を 5 回繰り返した場合の深度と曲げセンサと角速度の変化を図 10 に示す。変化が一番大きいのは

胸郭下部であり、吸気時の行動として胸を膨らませている。それに伴い胸郭下部が一端へこみ現象が見られる。他の実験協力者の深度情報から推定した5回深呼吸の様子を図11に示す。この計測ではアンダーシャツのみを着て実施した。胸郭部の複数箇所での変動を計測することで胸郭部の使い方が異なることが解る。このように呼吸に伴う胸郭部の使い方を観測することが出来る。

4. まとめ

曲げセンサによる胸郭部の拡張収縮計測を通じて呼吸を検出することができた。検出する物理量は抵抗値であり、装置が簡便である。曲げセンサの装着はバンドを体につけるだけなので簡単である。曲げセンサは胸郭の膨張収縮のみで変化するため、「曲げ」のみの検出で呼吸を観測する本方法は、行動中の呼吸検出に有効な方法と思われる。また、今回は立位での計測を行ったが姿勢によらずに計測が可能である。伏臥位を除いて就寝中での計測も可能である。曲げセンサの装着場所は今回の計測から変動が小さかった下腹部(b2)よりももっと上部が好ましい。

深度情報からは胸郭部の拡張収縮をカメラからの深度計測を通じて呼吸を検出することができた。体に装置を付ける必要がないため、実験協力者の負担は軽い。一方で深度の検出精度が2%程度の制約があり、これから最も好ましい測定条件は上半身着衣なしである。これは実験協力者の負担になる。胸郭前面がカメラで撮影可能ならば姿勢に制限はない。

高齢者の呼吸に関係する健康法として、ヨガ、マインドストーム、太極拳などの有効性が提案されている。今後、これらの提案行動と組み合わせ、高齢者が自身の呼吸状態の把握にどのようにつなげるか検討を行う。

謝辞

本研究の一部は科研費(19K03178, 20K03164)の助成を受けた。

参考文献

- (1) 総務省統計局 人口推計(2021年(令和3年)10月1日現在)結果の要約

- <https://www.stat.go.jp/data/jinsui/2021np/index.html> (2023/06/01)
- (2) 令和3年簡易生命表の概況
<https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/life/life21/dl/life21-15.pdf> (2023/06/01)
- (3) 田中美智子, 長坂猛, 矢野智子, 小林敏生, 榊原吉一: “意識的腹式呼吸がもたらす高齢者の自律神経反応及びホルモン変化”, 形態・機能, Vol10, No.1, pp.8-16 (2011).
- (4) 坂木佳壽: “腹式呼吸が自律神経機能に与える影響”, 体力科学, 50, pp.105-118 (2001).
- (5) 川崎卓也, 坂井泰, 柿崎藤泰, 西田直弥: “吸気量の変化が横隔膜変位量と腹部・下部胸郭容積変化に及ぼす影響”, 理学療法学, 39 Suppl. No.2, 0266 (2011).
- (6) 柳奈津子, 小池弘人, 小坂橋喜久代: “健康女性に対する呼吸法によるリラクセス反応の評価”, 北関東医学, 53, pp.29-35 (2003).
- (7) 半井悦朗, 釘宮豊城, 稲田英一: “呼吸管理に必要な呼吸生理”, 日集中医誌(J Jpn Soc Intensive Care Med.), 15, pp.49-56 (2008).
- (8) Bending Detection Sensor 60mm Effective length, TAIWAN ALPHA ELECTRONIC CO.,LTD, MB060-N-221-A02 <http://www.taiwanalpha.com/en/products/25> (20230609 確認)
- (9) Realsense SDK
<https://github.com/IntelRealSense/librealsense> (20230609 確認)
- (10) Satoshi Itou, Shoshi Inoue Kaie Washino: “Respiration detection using Inertial Measurement Unit”, The 2019 International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEE 2019) CES-3:Communicatios Room:401 B4, 13:30-13:50 Cot11th, (2019)