

安静時呼吸運動の準周期性に基づく
最大吸気圧/最大呼気圧の無拘束推定法の提案
Proposal of an Unconstrained Estimation Method for Maximum Inspiratory and Expiratory Pressure
Based on the Quasi-Periodicity of Resting Respiratory Motion

河野 友樹[†] 栗原 陽介[†]
Tomoki Kohno Yosuke Kurihara

1. はじめに

近年、慢性閉塞性肺疾患(COPD)による死亡者数は増加傾向にある[1]. その代表的な疾患である肺気腫では、呼吸機能の低下に加え、呼吸筋力の低下がみられる. 肺気腫患者は肺の過膨張により横隔膜が平坦化し、横隔膜筋の筋収縮能力が低下することが知られている[2]. このように、COPD は吸気筋と呼気筋から構成される呼吸筋に直接的な影響を与える. そのことから、呼吸筋力の評価は診断や経過観察において重要である. 現在、呼吸筋力の評価には、スパイロメータを用いた最大吸気圧(PI_{max}) / 最大呼気圧(PE_{max})の測定が一般的である[1]. しかしこの測定ではマウスピースを口にくわえる必要があり、息漏れに加え[3]、患者ごとにマウスピースの交換が必要である[4]. また、患者の努力呼吸による疲労といった問題がある. これまでの呼吸筋力に関する研究として、脳卒中や COPD 患者へのリハビリ効果の検証や、呼吸筋トレーニングによる評価項目の改善[3]や、胸郭周辺の変化測定や電磁誘導を用いた呼吸状態の推定など、非侵襲的手法が検討されてきた[6]. また、筆者らもこれまで、ベッド上での安静呼吸時における肺胸郭系の運動に伴う振動を、ベッドマットに設置した圧力センサで無拘束で計測し、5 つの特徴量を用いることで PI_{max} / PE_{max} を推定する手法を提案してきた [7]. 本研究は、[7] で用いられた 5 つの特徴量に加え、呼吸回数に関する特徴量を考慮することで、推定精度の向上を目指す.

2. 提案手法

2.1 無拘束圧力センサによる呼吸計測

提案手法として、ベッドマットレスとベッドフレームの間に設置した圧力センサを設置する. この状態でベッド上でヒトが横になり呼吸をすると、呼吸にともなう振動はベッドマットレスを伝わり、ベッドマットレスの下に設置したエアマットレス内の空気に伝搬する. この時の空気の圧力変動を高感度圧力センサで計測することで、呼吸に同期した圧力信号 $y(k)$ を得ることができる. ただし $y(k)$ には呼吸成分以外にも脈波、心音、胎動、肺音など多くの成分が含まれているため、 $y(k)$ にたいしバンドパスフィルタ(BPF)により呼吸信号として一般的な周波数帯域である 0.15-0.45Hz[3]の信号を呼吸成分として抽出する.

2.2 特徴量算出

先行研究[7]では、BPF を適用した $y(k)$ にたいし、肺活量指数に関連する F_1 : 最大-最小値、筋収縮のばらつきに関連する F_2 : 標準偏差、筋収縮速度に関連する F_3 : 最大/最小傾きを求め、さらに体格情報として F_4 : 身長、 F_5 : 体重の 5 つの値を特徴量として用いた. 本提案手法では、呼吸

筋力が衰退すると 1 回当たりの呼吸量が減少、それにより呼吸回数が増加する[5]ことを考慮し、体格情報 F_4 , F_5 に基づく呼吸回数の理想値と実測値の差(偏差)を特徴量 F_6 として加えることで、推定精度向上を図る. PI_{max} 推定時には、吸気由来の理想呼吸回数を用いる. 実測呼吸回数算出は、安静呼吸時の圧力信号 $y(k)$ にたいしフーリエ変換によりピーク周波数を算出し、60 をかけることで 1 分間の呼吸回数を算出し実測呼吸回数とする. 次に、理想呼吸回数は、対象者の体格によって変化する為、以下の(1), (2)式を使用し、 PI_{max} 推定時の F_6 と PE_{max} 推定時の F_6 を求める.

$$F_6 = 55.55 - 32.86 F_4 + 0.2602 F_5 \quad (PI_{max} \text{ 推定時}) \quad (1)$$

$$F_6 = 77.03 - 45.42 F_4 + 0.2373 F_5 \quad (PE_{max} \text{ 推定時}) \quad (2)$$

2.3 回帰分析による最大呼気圧/吸気圧の推定

本研究では特徴量 F_1 - F_6 にたいし回帰分析を適用することで PI_{max} , PE_{max} を推定する. 学習用の n 個のデータから F_1 - F_6 の特徴量と、スパイロメータにより各データごとの PI_{max} , PE_{max} をリファレンスとして取得する. 本提案手法では、 F_1 - F_6 にたいし重み w_1 - w_6 を掛けたものを説明変数、 PI_{max} , PE_{max} を目的変数とし、 PI_{max} , PE_{max} ごとの回帰モデルを構築する. 推定段階では、 PI_{max} , PE_{max} が道のデータから F_1 - F_6 の特徴量を算出し、学習済みの各回帰モデルに入力することで、 PI_{max} および PE_{max} の推定値を得る. 以上より、無拘束状態得られた安静状態の呼吸信号 $y(k)$ から最大吸気圧 PI_{max} , 最大呼気圧 PE_{max} を推定する.

3. 検証実験

検証実験では、安静呼吸中に得られた胸部圧力信号 $y(k)$ から PI_{max} , PE_{max} を推定する機械学習モデルを構築し、その推定精度を評価する. リファレンスとなる PI_{max} , PE_{max} の測定には、従来法に準拠したスパイロメータ(みなと医科学株式会社 AS-507)を用いる. 男女 11 名の実験協力者は、圧力センサを設置したベッド上で仰臥位になり 20 秒間の安静呼吸を実施してもらう. 圧力センサからの出力信号 $y(k)$ はサンプリング間隔 1kHz で取得し、1 名当たり 5 回の計測を行う. 推定に用いる特徴量には $y(k)$ から抽出した 6 つの特徴量を用い、最適な特徴量の重み w_1 - w_6 および、回帰手法の選択のために、遺伝的アルゴリズム(GA)を適用する. 回帰モデル(カーネル関数の種類)は、線形回帰(3 種類)、サポートベクター回帰(2 種類)、リッジ回帰、ラッソ回帰、ガウス過程回帰(9 種類)の 16 種類を用いる. w_1 - w_6 は 0-1 の範

[†] 青山学院大学 Aoyama Gakuin University

囲で決定し、最適化する。GA の設定は、個体数 80、世代数 300 とし、推定精度の評価には Leave-One-Data-Out 交差検証を用いた。評価指標には、RMSE を採用し、GA では RMSE を評価関数とし、RMSE が最小となるように進化させる。

4. 実験結果

GA により決定された実験結果を表 1, PI_{max} , PE_{max} ごとの散布図 1, 2 に示す。

表 1 最良個体の推定精度結果比較結果

RMSE	先行研究[7]	本研究
PI_{max}	1.38	1.35
PE_{max}	0.97	0.90

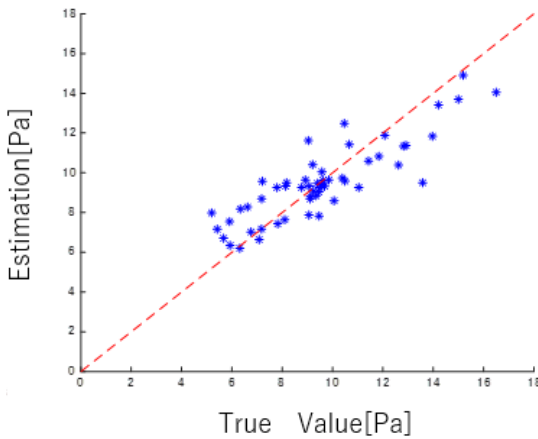


図 1 PI_{max} 推定時の散布図

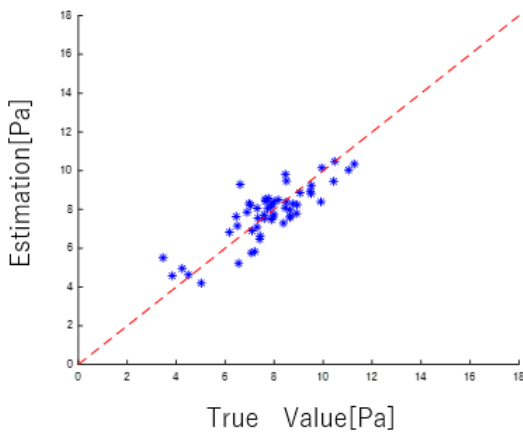


図 2 PE_{max} 推定時の散布図

表 1 に示すように、 PI_{max} , PE_{max} のどちらも先行研究[7]よりも精度向上が見られ、 PI_{max} 時は 0.05, PE_{max} 時には 0.07 の向上が見られる。

また、GA によって選ばれた各特徴量の重み、回帰手法、周波数を以下の表 2, 3 に示す。

表 2 各特徴量の重み

特徴量	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
PI_{max}	0.951	0.200	0.636	0.808	0.662	0.313
PE_{max}	0.006	0.653	0.219	0.902	0.768	0.528

PE_{max} 推定時における偏差の重みは 0.528 と影響度のある結果になった。 PI_{max} 推定時における偏差の重みは 0.313 と低い影響度を表す結果となった。

表 3 回帰手法

PI_{max}	ガウス過程回帰(Interactions)
PE_{max}	線形回帰(Ardexponential)

回帰手法では PI_{max} はガウス過程回帰(Interactions), PE_{max} では線形回帰(Ardexponential)が選ばれた。

5. 考察

先行研究[7]と比較し、精度向上したことから、今回提案した呼吸回数に関する特徴量は有効なものと考えられる。また、推定精度の向上が少量であった原因としては、GA による周波数帯域の探索が 0.15-0.45Hz で探索したことだと考えられる。実際はより広い範囲の周波数帯域にも特徴が出る可能性があると考えられる。

参考文献

- [1] 小高倫生, 松瀬厚人, “慢性閉塞性肺疾患(COPD)における Short-acting beta2-agonists (SABA) の位置づけ,” 日本臨床生理学会雑誌, Vol.50, No.3, pp.121-126 (2020).
- [2] 解良武士, “呼吸筋力の特性,” 理学療法科学, Vol.16, No.4, pp.231-238 (2001).
- [3] 解良武士, “呼吸筋力の測定,” 理学療法科学, Vol.17, No. 4, pp.265-271 (2002).
- [4] 横場正典, 阿部直, “呼吸器疾患と呼吸筋,” 日本呼吸管理学会誌, Vol.14, No.3, pp.406-408 (2005).
- [5] 山口巖, 森下宗彦, “小児領域における肺機能予測式に関する研究,” 日本呼吸学会誌, Vol.36, No.8, pp.665-671(1998).
- [6] 吉元俊輔, 桑谷達之, 黒田嘉宏, 大城理, “電磁誘導による呼吸機能計測,” 生体医工学(2017).
- [7] 池田優莉朱, 栗原陽介, “無拘束圧力センサを用いた安静呼吸時に伴う胸部圧力変動モデルの構築及び呼吸筋力推定システムの提案,” IIP 2025 (2025.3)