

圧電セラミックを用いたマスク型簡易肺機能評価システムの提案 Method for Evaluating Lung Function by a Simple Mask-Type Device Using Piezoelectric Ceramics

江本 光希[†]浜田 百合[†]栗原 陽介[†]

Koki Emoto

Yuri Hamada

Yosuke Kurihara

1. はじめに

新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の世界的な流行も起因し、近年、肺の炎症性疾患の 1 つである慢性閉塞性肺疾患(COPD: Chronic Obstructive Pulmonary Disease)に、関心が寄せられている。しかし、COPD は、その初期症状を老化によるものと見過ごしてしまったり、疾患に対する理解が不十分であったりすることから、診断率が低く、未診断・未治療の“隠れ COPD”患者が多く存在すると言われている。

医療機関における、従来の COPD の診断は、肺機能検査の 1 つであるスパイロメトリーによって、直接的に行われる。しかし、スパイロメトリーは、使用する測定機器の取り扱いが簡便でなく、高価である点[1]等から、在宅環境における測定の想定がされておらず、肺機能の日常的なモニタリングに不向きであることがその問題点の 1 つとして挙がる。

したがって、本研究では、肺機能の日常的なモニタリングに向けての取り扱いがしやすい COPD 診断システムとして、小型の圧電セラミックをマスクに設置した、取り扱いが簡便であるマスク型デバイスを導入する。そこから、得られる被験者の呼吸に基づく生体信号から、簡易に COPD のスクリーニングを行うシステムを提案する。

2. 提案手法

2.1 圧電セラミックによる生体信号取得

呼吸運動は吸息と呼息の繰り返し動作であり、この様な一連の呼吸運動によって生じる温度変化は、圧電セラミックで検出可能であると考えられる。浜田らの研究[2]では、圧電セラミックを様々な種類のマスクの中央部に設置し、それらを装着した上で、呼吸をする実験から、圧電セラミックによる呼吸検出が可能であるとの結論が述べられている。そこで、本研究では、安静呼吸の検出に用いられた圧電セラミックを、より大きな吸気、呼出運動が求められる肺機能検査の 1 種である努力肺活量測定に応用する。

圧電セラミックは、通常、振動センサとして用いられるケースが多く、温度変化を検知するセンサとして用いられるケースは少ない。しかし、他の一般的な温度センサは電源を必要とするものが多く、これに対し、圧電セラミックは電源を必要としない。また、非常に小型の構造を持ち、マスク内に設置したとしても、そのマスクを装着し、呼吸する際において、その存在が気になることはほとんどない。そのため、本研究では、圧電セラミックを用いて、被験者の努力肺活量測定による、マスク内の温度変化を計測した

[†] 青山学院大学 理工学部 経営システム工学科

Department of Industrial and Systems Engineering,
College of Science and Engineering, Aoyama Gakuin
University

生体信号から、気道狭窄あるいは気道虚脱による呼吸障害、呼吸筋力の減少等、より鋭敏な肺の閉塞性障害検出に用いられる指標である 1 秒率(FEV_{1.0})を推定することを目的とする。

2.2 FEV_{1.0}推定に向けた信号処理

圧電セラミックにより、計測された連続時間信号は A/D コンバータによって離散時間信号へと変換され、本手法では、この離散時間信号に処理を施して得られる、信号を用いて COPD 診断を行う。

前述した離散時間信号に対し、主に高周波成分を除去する目的として、離散フーリエ変換を基にした Band Pass Filter (BPF)を用いる。BPF において通過させる周波数帯域は、0.1Hz~10Hz とし、これを得られる離散時間信号に適用することで、高周波成分に由来するノイズを除去する。

その後、上述した BPF の適用により、導出された信号から、3 つの特徴量を抽出する。努力肺活量測定では、最大吸気位からできるだけ力一杯、できるだけ速く呼出した際の呼気量を記録する。ここで得られる呼気量の時間記録による曲線から、被験者が最大限息を吐いた状態である最大呼気位と被験者が最大限息を吸った状態である最大吸気位との間の肺容積変化を示す、努力肺活量(Forced Vital Capacity: FVC)や、時間呼気流量(Forced Expiratory Volume: FEVt)が求められる。とりわけ 1 秒量(FEV_{1.0})は、呼気始めから 1 秒間の呼出量を指し、様々な病態により減少する指標として重要である。そこで、今回抽出する特徴量として、BPF 適用後の波形の最大値、最小値、最大値から 1 秒後の値の 3 つを選択する。

本提案手法の最終的な目的である FEV_{1.0}推定に際しては、BPF 適用後の波形から抽出された 3 つの特徴量とリファレンスとして用いたスパイロメーターから得られる正解 FEV_{1.0}を基に、ガウス過程回帰によって行う。

3. 検証実験

3.1 実験システム

本研究では、生体信号を取得するために使用するデバイスとして小型の圧電セラミックをマスクに設置した、マスク型デバイスを用いる。一般的な不織布マスクの中央に圧電セラミックを設置し、計測用コードをつないだ構造をとる。

このデバイスを通常のマスクと同様に装着し、呼吸をするので、デバイスを装着した被験者の呼吸運動に伴う生体信号を取得する。

被験者には椅子の上で座位をとらせ、初めにデバイスの調整のために、15 秒間の安静時間を設ける。その後データの計測を開始し、被験者には任意の回数安静呼吸をしたのちに、最大吸気位からできるだけ力一杯、できるだけ速く呼出する努力肺活量の測定を再現するよう指示を出した。



図 1 使用したデバイス

この測定から得られる生体信号を利用し、 $FEV_{1.0\%}$ を推定する。

3.2 実験設定

実験の各種設定に関して、データの計測は、デバイスのサンプリング周波数は 1000Hz に設定、被験者は 20 代男性 3 名であり、データ数は計 15 データである。

また、本実験では、提案手法により推定された $FEV_{1.0\%}$ の推定精度を検証するために、リファレンス及びスパイロメーターとして、オートスパイロ[AS-507](ミナト医科学株式会社)を使用する。実際のスパイロメーターと同じく、3 回同様の測定を両デバイスにて同日同条件で行い、その平均値を比較した。

提案デバイスから取得した生体信号は、2 章で提案した BPF を適用し、導出される信号から、特徴量の抽出を行う。抽出された特徴量とリファレンスによる $FEV_{1.0\%}$ を基に、Leave-one-data-out 交差検証から、推定された $FEV_{1.0\%}$ を正解値と比較し、その Root Mean Square Error (RMSE) を算出することによって提案手法の評価を行う。

4. 実験結果

提案デバイスから取得した生体信号と、取得した生体信号に対し、2 章で提案した BPF を適用した信号のうち 1 例を図 2 に示す。図 2 上部の波形が提案デバイスから取得した生体信号を示し、下部が取得した生体信号に対し、BPF を適用したものである。

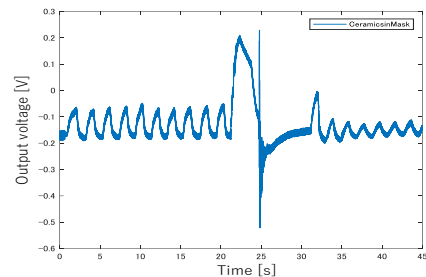
2 つの波形の比較から、提案した BPF の適用によって、生体信号からスクラッチノイズが除去されている様子が確認できる。また、高周波成分が除去されたことで、比較的滑らかな波形となり、高周波成分に左右されない、適切な特徴量抽出が可能となった。

また、特徴量の抽出及び、ガウス過程回帰を基とした Leave-one-data-out 交差検証から、推定された $FEV_{1.0\%}$ と正解値の間の RMSE は、16.82% となった。

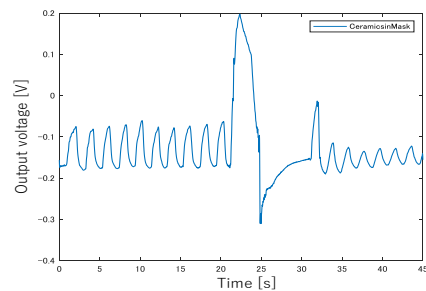
5. むすび

本研究では、従来の肺機能検査方法であるスパイロメーターの改善手法となり得る、肺機能の日常的なモニタリングに向けての取り扱いが簡便な COPD 診断システムとして、圧電セラミックを用いることで取得される信号から、簡易に COPD のスクリーニングを行う手法を提案した。

提案デバイスから取得した生体信号と、取得した生体信号に対し、2 章で提案した BPF を適用した信号から、本実験に参加した被験者の最大吸気位から最大呼気位まで呼出し続ける、努力肺活量の測定再現区間が判別可能であることが分かった。



(a) BPF 適用前



(b) BPF 適用後

図 2 データへの BPF 適用効果

提案した手法が目指すべき最終的な推定値と比べると、今回得られた推定値は COPD 診断においては、不十分であると考えられるが、筆者らがこれまで提案してきた圧力センサを用いた COPD スクリーニングシステム[3]や聴診器を導入したデバイスによる COPD スクリーニングシステム[4]と比較すると、本提案デバイスによる呼吸に基づいた生体信号取得は、その簡便さにおいて、大きく上回っている。今回は 1 つの圧電セラミックを組み込んだデバイスを提案したが、今後は、2 つ以上の圧電セラミックをデバイスに組み込んだバイモルフ型デバイスを導入し、測定感度の向上を試みたり、新たなフィルタを導入し、よりリファレンスから得られる呼気流量波形に近づけたりすることによって、より高精度な推定結果が得られるように検討をしてゆきたいと考えている。

参考文献

- [1] 佐藤 勲, 青木 義満, “2 カメラ Fiber Grating 呼吸モニタを用いた慢性閉塞性肺疾患症状のスクリーニング”, *Medical Imaging Technology*, Vol. 30, No. 2, pp. 73-82 (2012).
- [2] Y. Hamada, T. Yoshida, Y. Kurihara, K. Watanabe, “Respirometry Rate Measurement by Pyroelectric Effect of a Piezo Sounder—Monitor and Alarm by Single Device”, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 22, No. 1, pp. 21197-21208 (2022).
- [3] K. Emoto, Y. Hamada, Y. Kurihara, “Gaensler’s Forced Expiratory Volume in One-Second Percent Estimating Method by Unconstrained Bed-Type Sensing Device for Diagnosing Chronic Obstructive Pulmonary Disease”, *The 9th IIAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2022* (2022).
- [4] K. Emoto, Y. Hamada, Y. Kurihara, “Method for Estimating Gaensler’s Forced Expiratory Volume in One Second Percent Using a Built-in Stethoscope for Diagnosing Chronic Obstructive Pulmonary Disease”, *The 11th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering 2023* (2023).