

努力性肺活量測定時における臥位の違いを考慮した 無拘束 Gaensler1 秒率推定手法の提案

江本光希^{†1} 浜田百合^{†1} 栗原陽介^{†1}
青山学院大学^{†1}

1. はじめに

慢性閉塞性肺疾患(COPD: Chronic Obstructive Pulmonary Disease, 以下, COPD)は, タバコ煙を主とする有害物質を長期に吸入曝露することで生じる, 喫煙習慣を背景に, 主に中高年に発症する肺の炎症性疾患である. タバコの煙を吸入することで, 肺の中の気管支に炎症がおき, 咳や痰が出たり, 気管支が細くなることによって, 呼吸における酸素の取り込みや二酸化炭素を排出する機能が低下したりする. それによって, 歩行時や階段昇降など, 身体を動かした際に息切れを感じる労作時呼吸困難や慢性の咳や痰が特徴的な症状として挙げられる. 世界では, 少なくとも 2 億 1 千万人もの人々が COPD を罹患しており, これによって年間約 300 万人が死亡していると推定されている[1]. また, 国内外で罹患数, 死亡者数がともに増加の傾向をみせており, WHO(World Health Organization)の報告によると, 世界死亡原因の第 3 位となっている[2]. しかし, COPD は, その初期症状を老化によるものである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, 今日の医療における重大な疾患の 1 つである.

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. スパイロメトリーから得られる指標のうち, 最大吸気位からできるだけ一杯, できるだけ速く呼出した際の呼気量を記録したものを努力呼気曲線(Tiffeneau 曲線)といい, この曲線から最大呼気位と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(FEV1.0)は, 呼気始めから 1 秒間の呼出量を指し, 気道狭窄あるいは気道虚脱による呼気閉塞がある場合や, 呼気筋力の減少等, 様々な病態により減少する指標として重要である. この 1 秒量は, 肺活量の大きさによっても規定されることから, より鋭敏な閉塞性障害検出のための指標としては, 1 秒量を努力肺活量で除した 1 秒率(FEV1.0%)が用いられることが多い.

しかし, スパイロメトリーに際する一連の操作では, 被験者がマウスピースやノーズクリップを装着する接触型の測定を行うため, 機器の汚染対策や消毒, 測定毎にマウスピー

スの交換が必要である点[3], また, スパイロメーターが高価であり, 取り扱いが簡便でない点[4]などが問題点として考えられている.

前述したいくつかの問題点に加え, 現在の COPD を取り巻く諸状況を踏まえ, スパイロメトリーの改善手法となり得る, 非接触で比較的に取り扱いが簡便である COPD 診断手法の提案が望まれている.

筆者らは, これまで, 換気に伴う肺・胸郭部の動きを高感度圧力センサを用いて取得し, 肺・胸郭部-呼気流量モデルを基に呼気流量を推定した後に, FEV1.0%を推定する手法を提案してきた[5]. しかし, 上記の手法では, 仰臥位における FEV1.0%を推定しており, 立位または座位にて行われる実際のスパイロメトリーでの FEV1.0%と同等に扱うことはできなかった.

したがって, 本研究では, 非接触であり, 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, 高感度圧力センサを用いることで取得される信号から, 呼吸による横隔膜と肺, 気管支の物理的挙動を考慮したモデルより, 呼気流量を推定した上で, 努力性肺活量測定時における臥位の違いを考慮した無拘束 Gaensler1 秒率推定手法を提案する.

2. 提案手法

2.1 高感度圧力センサ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, 吸息時は, 横隔膜をはじめとする呼吸筋を能動的に収縮させ, 籠の様な構造をもつ胸郭を広げることによって胸腔内の容積を増し, 内側を陰圧にして肺を拡張させ, 空気を吸い込む作業が行われる. 呼息時は逆に, 呼吸筋を弛緩させて胸郭をもとの状態に戻し, 肺の自ら縮もうとする力(肺の弾性)によって空気を吐き出す作業が行われる[6].

この様な一連の呼吸運動によって生じる肺・胸郭系の振動は, ベッドマットレスの下に敷いたエアマットレスの内圧を変化させると考えられ, その内圧変動はエアマットレスに設置された圧力センサで計測される. 得ら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, 呼吸時における呼気流量推定値をもとに, Gaensler1 秒率を

Method for Unconstrained Estimating Gaensler's Forced Expiratory Volume in One-Second Percent Considering the Differences in the Recumbent Position

^{†1} KOKI EMOTO, YURI HAMADA, YOSUKE KURIHARA, Aoyama Gakuin University.

推定する。

2.2 肺・胸郭部一呼気流量モデルの実装

2.1 節で述べた離散時間信号を用いて、呼吸における呼気流量を推定する。推定に際しては、呼吸による横隔膜と肺、気管支の物理的挙動を考慮した“肺・胸郭部一呼気流量モデル”を実装し、導入する。このモデルは、主に3つのフェーズ、(i)横隔膜一肺の運動方程式、(ii)肺の断熱変化、(iii)呼気流量にまつわる肺一気管支の関係によって構築される。

2.3 呼気流量推定に向けての信号処理

本手法の呼吸における呼気流量推定に関しては、カルマン smoother を導入し、推定を行う。カルマン smoother の構成に関しては、2.2 節で実装した“肺・胸郭部一呼気流量モデル”に基づき、これを2.1 節で述べた離散時間信号に対して適用することで、呼気流量推定値を導出する。

2.4 努力肺活量測定時における臥位の違いの考慮

2.3 節で導出された呼気流量推定値をもとに、努力肺活量測定時における臥位の違いを考慮した Gaensler1 秒率を推定する。仰臥位でのスパイロメトリーにおける努力肺活量測定から得られる FEV1.0, FVC と、立位時のスパイロメトリーにおける努力肺活量測定から得られる FEV1.0, FVC を回帰分析する。これにより仰臥位で推定された FEV1.0, FVC から立位時の FEV1.0, FVC 値をそれぞれ推定する線形回帰モデルを構築する。この線形回帰モデルを用いて、呼気流量推定値における推定1秒量(FEV1.0*), 推定努力肺活量(FVC*)から、Gaensler1 秒率を推定する。

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圧力センサを用いる。2枚のシートの間にチューブを通し、その一端を封じ、もう一端に圧力センサを設置する。

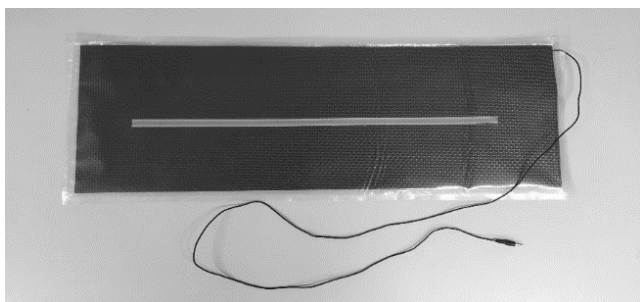


Fig. 1 使用した圧力センサ

このデバイスをベッドマットレスの下に敷くことで、ベッドの上に横たわる被験者の呼吸運動に伴う肺・胸郭部の動きを含んだ生体信号を取得する。なお、実験を通して、デバイスから、より高感度に信号を取得するために、被験者のおおよそ胸部あたりに、センサを設置した。センサの設置位置を Fig. 2 に示す。



Fig. 2 ベッドとセンサの設置状況

また、本実験では、求める生体信号と呼気流量のリファレンスを同時計測するために、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。

更に、立位時でのスパイロメトリーによる努力肺活量測定を行い、仰臥位でのスパイロメトリーと比較し、線形回帰モデルを構築するために用いた。

3.2 実験の手順と各種設定

被験者はベッドの上で仰臥位をとり、初めに圧力センサの調整のために40秒間の安静状態をとる。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、努力肺活量の測定を再現してもらう。

実験の各種設定に関して、データの計測は、圧力センサのサンプリング周波数は100Hzに設定、スパイロメーターのサンプリング周波数は、あらかじめ10Hzに定められているが、圧力センサとのサンプリング間隔の相違を解消するため、リファレンスに対して、スプライン補間を施し、100Hzで再サンプリングした。被験者は健常な20代男女13名であり、計28データ取得した。

また、努力肺活量測定時における臥位の違いを考慮するために行った立位でのスパイロメトリーでは、被験者毎にそれぞれ1回もしくは3回の測定を行った。取得した仰臥位でのスパイロメトリーと立位でのスパイロメトリーのFEV1.0及びFVCを、各被験者毎に平均し、線形回帰モデルの構築を行った。

4. 実験結果

4.1 推定波形

生体信号に対してカルマン smoother を適用したものとリファレンスによる呼気流量の波形の 1 例を Fig. 3 に示す.

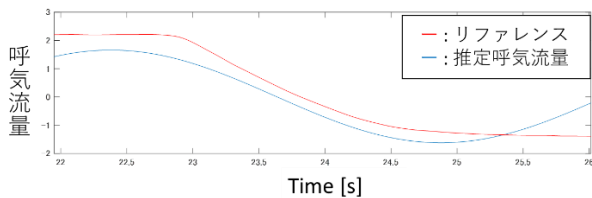


Fig. 3 提案手法による呼気流量推定

本提案手法により推定された呼気流量は、リファレンスによって記録された呼気流量と似たフローになっていることが確認でき、どちらからも努力肺活量測定の実験区間がみとることができる。

4.2 臥位の違いによる FEV1.0 及び FVC の比較

仰臥位での 1 秒量と立位での 1 秒量、仰臥位での FVC と立位での FVC それぞれを比較した散布図を Fig. 4, Fig. 5 に示す.

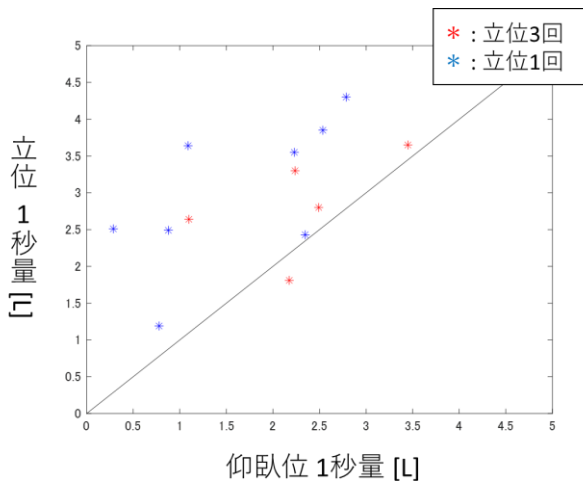


Fig. 4 仰臥位と立位における 1 秒量の比較

仰臥位における 1 秒量は、立位における 1 秒量と比較し、小さい値をとった被験者が 13 名中 12 名であった。これは、仰臥位での努力肺活量測定では、立位の場合と異なり、胸部部に重力がかかり、瞬間的に呼息を行うことが困難なためと考えられる。

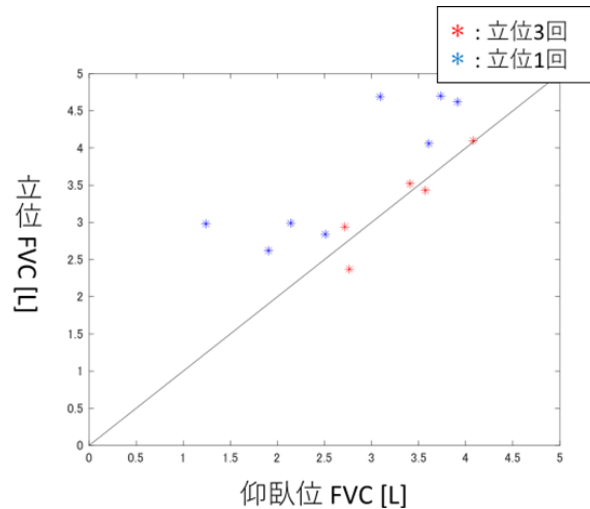


Fig. 5 仰臥位と立位における FVC の比較

仰臥位における FVC は、立位におけるそれと比較し、比較的近い値をとった被験者は、13 名中 11 名であった。仰臥位が立位と比較し、小さい値をとっている被験者も存在するが、1 秒量の場合に比べて、瞬間的な呼息が影響せず、立位と近い値をとる被験者が多くなったと考えられる。

4.3 推定 Gaensler1 秒率

推定呼気流量と努力肺活量測定時における臥位の違いを考慮した線形回帰モデルを用いて、推定した Gaensler1 秒率と立位でのスパイロメトリーから取得した Gaensler1 秒率を比較した散布図を Fig. 6 に示す.

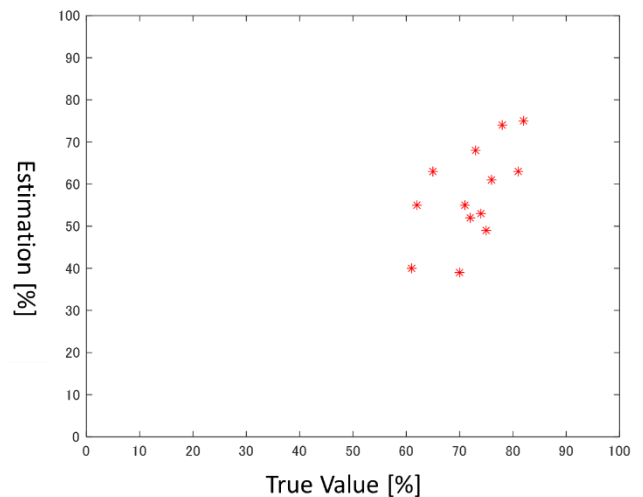


Fig. 6 推定 Gaensler1 秒率と立位における Gaensler1 秒率

本研究の提案手法により、推定された Gaensler1 秒率と立位でのスパイロメトリーから得られた Gaensler1 秒率を比較すると、相関係数 0.59 であったが、正解値に比べて、推定値が小さくなっていることが多い。

5. おわりに

本研究では、従来の検査方法や 1 章で挙げた先行研究の改善手法となり得る、非接触であり、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、圧力センサを用いることで取得される信号から、呼吸による横隔膜と肺、気管支の物理的挙動を考慮したモデルより、呼気流量を推定し、努力性肺活量測定時における臥位の違いを考慮した、無拘束 Gaensler1 秒率推定手法を提案した。

推定波形とリファレンスによる呼気流量波形の比較から、努力肺活量の測定再現区間が提案手法によっても判別可能であることが分かった。また、努力性肺活量測定時における臥位の違いが FEV1.0 及び FVC へ与える重力の影響が実測データから確認できた。

提案した手法が目指すべき最終的な推定値と比べると、今回得られた結果は COPD 診断においては、不十分であると言えるが、本研究によって、臥位の違いと FEV1.0 や FVC の関連が確認できたことは 1 つの収穫であり、今後は、より高精度な推定結果が得られるように更なる検討をしてゆきたいと考えている。

参考文献

- [1] Forum of International Respiratory Societies (FIRS), “Respiratory diseases in the world. Realities of today – opportunities for tomorrow”, African Journal of Respiratory Medicine, Vol. 9, No. 1, pp. 4-13, 2014
- [2] 工藤 翔二, ”COPD の疫学と予防 : 健康日本 21(第 2 次)を中心に”, 日本内科学会雑誌, Vol. 104, No. 6, pp. 1059-1066, 2015
- [3] 藤田 次郎, 根ヶ山 清, 横井 博信, 末包 裕美, 河西 浩一, 高原 二郎, ”肺機能検査装置の細菌汚染についての検討”, 環境感染, Vol. 9, No. 3, pp. 24-27, 1994
- [4] 坂本 寛和, 孫 光鎬, 松井 岳巳, 桐本 哲郎, ”ToF カメラを用いた肺機能検査測定システムによる呼吸機能の非接触モニタリング”, 生体医工学, Vol. Annual57, No. Abstract, S239_2, 2019
- [5] 江本 光希, 小濱 美咲, 浜田 百合, 栗原 陽介, ”慢性閉塞性肺疾患診断のための無拘束呼気流量推定による Gaensler1 秒率推定手法の提案”, 第 17 回日本感性工学会春季大会, 2022
- [6] 鈴木 克昌, 高橋 仁美, 菅原 慶勇, 笠井 千景, 清川 憲孝, 渡邊 暢, 藤井 清佳, 柏倉 剛, 佐竹 将宏, 塩谷 隆信, ”肺機能予測としての胸郭拡張差測定の有用性の検討”, 日本呼吸ケア・リハビリテーション学会誌, Vol. 17, No. 2, pp. 148-152, 2007