

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：37128

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K04218

研究課題名（和文）人工呼吸のための数理モデル化手法と呼吸管理の医療支援システムの開発

研究課題名（英文）Development of mathematical modeling methods and medical support system for artificial respiration

研究代表者

金江 春植（Kanae, Shunshoku）

純真学園大学・医療工学科・教授

研究者番号：90274555

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、呼吸システムのモデリングの手法として、人工呼吸時の計測データと人工呼吸前後の呼吸器検査データをもとに患者さんの呼吸システムの時間特性を表すニューラルネットワークモデルとその学習法を考案した。また、呼吸の摂動を考慮した各データ処理段階における重み付き平滑化法を提案した。呼吸システムの履歴特性については、呼気と吸気の2セットパラメータモデルを考え、呼気吸気の切り替えポイントを拘束条件としたパラメータ推定法を考案し、より呼吸システムを正確にとらえたモデルを提案した。数理モデルの基礎研究としては、変数誤差モデルの推定、分布型ネットワークの同定において新たな知見を得ている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

（1）医学的アプローチによる呼吸ダイナミクスを説明する複雑な数理モデルは数例提案されているが、本研究は人工呼吸を目的とした工学的手法で実用的である。
（2）呼吸の時間特性を考慮するので、患者の普段の呼吸パターンに近い換気条件の設定が期待でき、快適な人工呼吸が可能になる。また、非線形の呼吸システムに時定数に準ずる時間応答特性を考慮しており、学術的にも新たな試みである。
（3）臨床データを対象にしており、実用的なパラメータ推定法であると考えられる。また、実在している肺エラストランスの履歴特性と呼吸の摂動を考慮するため、より正確なモデリングが期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study a neural network model and its learning method is proposed to describe the time characteristics of a patient's respiratory system based on measurement data during artificial respiration and respiratory examination data before and after artificial respiration. Additionally, a weighted smoothing method is proposed for each data processing stage, considering respiratory perturbations. Regarding the historical characteristics of the respiratory system, a two-set parameter model for exhalation and inhalation is considered, and a parameter estimation method is devised with the switching point between exhalation and inhalation as a constraint, resulting in a more accurate model for capturing the respiratory system. As part of the foundational research on mathematical models, new insights are gained in the estimation of variable error models and system identification of distributed networks.

研究分野：自動制御

キーワード：人工呼吸 呼吸システム 呼吸モデル システム同定 パラメータ推定 最小二乗法 呼吸管理

研究科題名：

人工呼吸のための数理モデル化手法と呼吸管理の医療支援システムの開発

1. 研究開始当時の背景

人間の呼吸システムは年齢、性別、体質、体調（病状）によって異なっており、人工呼吸は各患者呼吸システムの特徴に合わせて個々に適切な換気条件を設定することが望ましい。患者の肺エラスタンス、気道レジスタンス、呼吸時間特性などを含む呼吸システムの数理モデルを知ることは換気条件を適切に設定する前提であり、また、呼吸の計測データから推定された呼吸系の特徴曲線等をもとに換気条件を決定するためには確実に最良換気に近い換気を保証する決定法が必要である。

呼吸システムの数理モデルについては、呼吸のダイナミクスを表すモデルとして、従来から1階微分方程式モデルや Otis, Mead や Mount らの2階線形微分方程式モデルがあるが、肺のエラスタンスや気道のレジスタンスを定数として仮定しているため、本来肺のエラスタンスや気道レジスタンスに存在する非線形特性を表すことができず、その非線形の特徴曲線に基づく気道気圧上限値の設定が原理的に不可能である。十数年前、肺エラスタンスと気道レジスタンスの非線形性に注目して、これらを肺の体積および空気流量の多項式で表現した非線形回帰モデルが村松らに提案されているが、呼吸システムの動特性を十分に考慮せず、結果的に信頼できるエラスタンス特性の推定は困難であった。ここで、患者の呼吸モデルをどのような構造にし、その中で肺エラスタンス、気道レジスタンスをどのように表現するか、呼吸の気圧・流量の観測データからどのように呼吸モデルのパラメータおよび呼吸の特徴曲線を推定するかが基本課題である。モデル構造の選択においては、パラメータの物理的意味、モデル推定の容易さ、モデルメンテナンスの簡便さなどを考慮に入れなければならない。

換気条件の設定法に関しては、患者の呼吸システム特性推定を基に自動的に適切な換気条件を決めるような理論整備がなされていなかった。ここでは、呼吸の状態を評価する評価指標関数を策定し、呼吸システムの特徴推定量から換気条件を自動的に決定する推論機構を確立しなければならない。呼吸の測定データにはノイズが存在し、推定の誤差を考慮に入れたロバストな決定法が必要である。

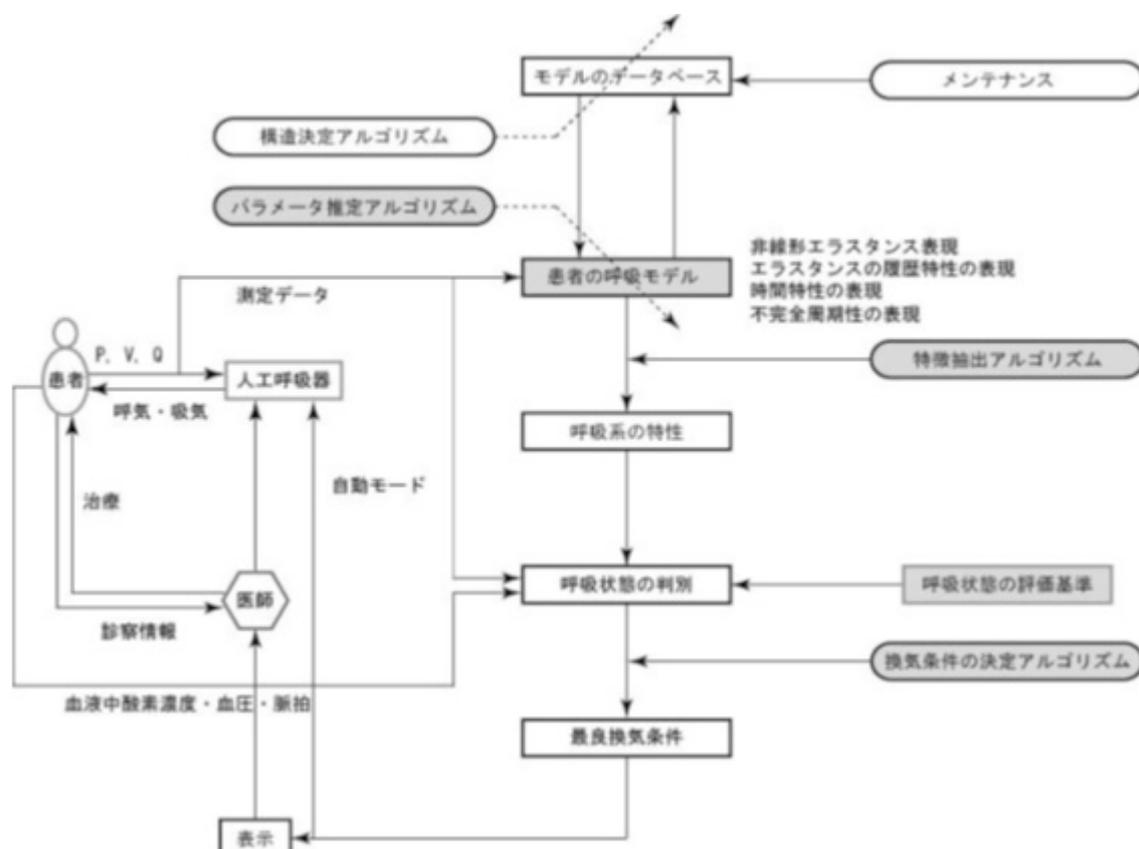
また、人間の肺は飽和特性のみならずヒステリシス特性も持っている複雑な対象であり、呼吸自体も完全な周期性を持つようなものではない。このような要素を含む呼吸システムのモデリングとその推定、患者個々の時間特性の表現とその推定は、制御工学においてもチャレンジングなものであり、制御工学の医療応用でも大いに意義がある。

2. 研究の目的

本研究は、呼吸システムのモデリングの手法を確立し、人工呼吸時の測定可能なデータより各々の患者の呼吸特性を特定し、それぞれの患者に適合する換気条件を自動的に設定する仕組みを作り上げ、安全かつ快適な人工呼吸を可能にする人工呼吸管理の新しい枠組みを開発することを全体の目標としている。本申請の研究開発においては、これまでの研究成果を踏まえ、新しい人工呼吸管理のための数理モデル構築法および、換気条件の最良設定法を具体的に提案する。

3. 研究の方法

下の図は、我々が目指している人工呼吸監視制御システム概念図である。本研究は次の各課題（図中灰色の背景で示した各部分）に取り組み、問題の解決を目指す。



1) 人間には各自の呼吸のリズムがあり、人工呼吸が患者の元来のリズムに合わせて呼吸させることが安心快適な医療につながると考えている。非線形の呼吸システムの時間特性を表す方法を考案し、さらに人工呼吸の時間応答からその時間特性を推定可能にする。

2) 呼吸の各サイクルで人工呼吸器が同じ動作をしても、呼吸のP(気圧)-V(体積)曲線は基本的に重複せず、そのデータに基づいて推定した肺エラスタンス曲線も呼吸サイクルによってバラつく。一連のサイクルで不完全周期性を持つデータよりの確に呼吸特性を推定する方法を開発する。

3) 呼気と吸気では異なるエラスタンス特性を持ち、肺内気圧と肺体積の関係を示す静的 PV 曲線には履歴特性がある。患者の呼吸系の特性をより正確に知るためにはこの履歴特性を無視することなく、モデル化して推定する方法を提案する。

4) 呼吸の質を評価する適切な指標を策定し、その指標を最大化するような最良換気条件を決定する推論法を開発する。

4. 研究成果

本研究では、呼吸システムのモデリング手法の構築と人工呼吸の医療支援システムに関して以下の知見が得られたのでまとめておく。

1) 自律呼吸のない人工呼吸では、呼吸器側のリズムにそって肺が受動的に膨張と収縮を繰り返すので、患者さん元来の呼吸系の時間特性が出にくい。しかし、気圧変化に対する肺体積の時間応答には各々の個人差が存在し、その応答特性と患者さんの呼吸リズムとの関係性が考えられる。従って、人工呼吸時の時間応答から時間特性を数値的に表現し、時間特性を推定可能と考えられる。a. 呼吸における時間特性の表現について：人工呼吸時の気圧変化に対しする肺の体積変化は非線形特性を持ち、線形システムの時定数のような簡単な数値表現法では無理がある。肺体積の時間応答曲線を分割し、所要時間を特徴量として保存する。分割の方法は気圧の大きさによって適切に調整する。このような非線形性を持つ肺体積変化の時間応答について時間特性を数値的に記述する。b. 呼吸の時間特性の推定：患者さんの呼吸リズムデータは手術前の呼吸検査または回復後の呼吸検査で取得して教師信号とし、人工呼吸時の時間特徴量をニューラルネットワークモデルでその関係を表現し、機械学習によって呼吸リズムを推定する。

2) 人工呼吸器が同じ動作をするとしても、各サイクルの P(気圧)-V(体積)曲線は重複せず、そのデータに基づいて推定した呼吸システムのエラスタンス・レジスタンスも呼吸サイクルによってばらつく。一連の摂動を持つ呼吸サイクルのデータをもとに、一定の時間幅をもって、データの重み付き平滑化または、中間データの重み付き平滑化、推定パラメータの重み付き平滑化を行い、信頼できる患者さんの呼吸モデルを得る。

3) 実際、呼気と吸気では異なるエラスタンス・レジスタンス特性を持つゆえ、肺内気圧と肺体積の関係を示す静的 PV 曲線には履歴特性がある。呼気と吸気の 2 セットパラメータモデルを提案し、呼気終了時と吸気開始時および吸気終了時と呼吸開始時の PV 曲線が同一点を通過することを勘案し、これを拘束条件としてモデルのパラメータを推定する。こりより患者さんの呼吸系の特性をより正確にとらえた履歴特性を表現したモデルを得る。

4) 呼吸の質を評価する数値指標の策定を試みた。患者さんが安静時の呼吸が一番楽な状態であると考えられ、人工呼吸時の血中酸素濃度、呼気吸気時間の長さ、気道気圧の最大値、肺体積の変化量などの各指標がどれだけ安静時と乖離しているかを数値的に評価して、重みをつけて総合する。

5) 計測データから数理モデルを推定する基礎研究として、変数誤差モデルにおける一般

化固有値問題の繰り返しアルゴリズム、バイアス補償最小二乗平均推定法、雑音環境における適応型等化アルゴリズム、分布型ネットワークにおけるスパースシステム同定のための LI-RLS タイプのバイアス補償型推定アルゴリズムを提案した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Y. Du, L. Jia, S. Kanae, Z. Yang	4. 巻 18-2
2. 論文標題 Diffusion logistic regression algorithms over multiagent networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Control Theory and Technology	6. 最初と最後の頁 160-167
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Zhang, S. Kanae, J. Bai, Z. Zhou	4. 巻 41-5
2. 論文標題 The method of pulmonary static pressure value prediction based on PSO_GRNN network	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chinese Journal of Scientific Instrument	6. 最初と最後の頁 174-184
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yu Xu, Yang Li, Hezheng Li, Shunshoku Kanae, Jing Bai	4. 巻 33
2. 論文標題 Robustness of current source inverter based on H-infynity control	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Int. J. Modelling, Identification and Control	6. 最初と最後の頁 152-158
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件／うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Chen Zhu, Lijuan Jia, Shunshoku Kanae, Zijiang Yang
2. 発表標題 Robust Diffusion Adaptive Networks with Noisy Link and Input
3. 学会等名 CCC 2022 - 41th Chinese Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Senran Peng, Lijuan Jia, Shunshoku Kanae, Zi-jiang Yang
2. 発表標題 Bias-compensated Sparse RLS Algorithms Over Distributed Networks
3. 学会等名 CCC 2022 - 41th Chinese Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Zhen Zhang, Lijuan Jia, Shunshoku Kanae, Zi-Jiang Yang
2. 発表標題 Blind Equalization under noisy environment using bias-compensated method
3. 学会等名 CCC 2021 - 40th Chinese Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池之上雅人、金江春植、和田清
2. 発表標題 UD分解を用いた重み付き最小2乗推定の繰り返しアルゴリズム
3. 学会等名 第63回システム制御情報学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池之上雅人、金江春植、和田清
2. 発表標題 変数誤差モデル同定における一般化固有値問題の繰り返しアルゴリズム
3. 学会等名 第63回システム制御情報学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jili Yang, Lijuan Jia, Cheng Ma, Lu Fan, Shunshoku Kanae
2. 発表標題 Gossip BCLMS Method over multi-agent networks
3. 学会等名 The 38th Chinese Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shunshoku Kanae, Jing Bai, Lijuan Jia, Masato Ikenoue
2. 発表標題 Pulmonary Elastance Estimation Considering Periodicity and Perturbation of Respiration
3. 学会等名 The 37th Chinese Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Qi Tang, Lijuan Jia, Shunshoku Kanae, Zijiang Yang
2. 発表標題 Adaptive Filtering of EIV-FIR System by Solving Eigenvalue Problems
3. 学会等名 The 37th Chinese Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Lu Fan, Lijuan Jia, Tang Tang, Shunshoku Kanae
2. 発表標題 Diffusion Bias-compensated Least Mean Square Algorithms Over Multi-agent Networks
3. 学会等名 The 37th Chinese Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masato Ikenoue, Shunshoku Kanae, Kiyoshi Wada
2. 発表標題 Recursive Algorithm of Bias Compensated Weighted Least Squares Method
3. 学会等名 The 50th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Xianneng Li, Meihua Yang, Huiyan Yang, Shizhe Wu, Guangfei Yang, Min Han, Shunshoku Kanae
2. 発表標題 Analysis of Population Size in Artificial Bee Colony Algorithm
3. 学会等名 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	杉井 裕 (Sugii Yu) (50805166)	純真学園大学・医療工学科・講師 (37128)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------