

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：33401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420454

研究課題名(和文) 数理モデルに基づく人工呼吸監視制御の新しい展開

研究課題名(英文) A new challenge of monitoring and controlling of artificial respiration based on mathematical model

研究代表者

金江 春植 (KANAE, SHUNSHOKU)

福井工業大学・工学部・教授

研究者番号：90274555

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：人間の呼吸系の特性は各個人によって異なっており、各患者の呼吸システムの特性を推定し、その結果に基づいて人工呼吸の換気条件を適切に設定することは安心安全の医療に取って必要不可欠である。本研究では、ファジィロジックによる肺エラストランス表現を用い、そのエラストランスを含んだ非線形2階微分方程式で呼吸のダイナミクスをモデリングし、呼吸の観測データからモデルのパラメータを推定することによって各患者の呼吸特性を推定し、その推定結果を用いて人工呼吸の気圧上限値などの換気条件を決めるアプローチを提案している。

研究成果の概要(英文)：The properties of human respiratory system vary among each individual. It is essential to medical care of the reliable security that estimates characteristic of the respiratory system of each patient and sets a ventilation condition of the artificial respiration based on the estimated result. In this research, we propose an artificial respiratory monitoring and controlling system, in which system with the fuzzy logic expression of pulmonary elastance, the breathing dynamics is modeled by nonlinear second order differential equation containing the elastance term, the parameters of the model are estimated from respiratory measurement date and the ventilation condition is decided based on the estimated result.

研究分野：工学

キーワード：バイオシステム工学 医工学 人工呼吸

1. 研究開始当初の背景

救急の場合のみならず、重症呼吸不全の患者や大手術の患者にいたるまで、幅広く人工呼吸が行われている。人工呼吸は外部から一定の圧力で新鮮な空気を肺内に送り込み、また、膨らんだ肺の収縮力で肺の中の廃気を外部に排出する、といったサイクルを繰り返すことによって酸素と二酸化炭素の換気を行うことである。人工呼吸の実施においては、換気モードや毎分換気回数、吸気時間、気道内圧上限値など、換気条件に関わる諸量を適正に設定する必要がある。これらの設定を間違えると患者の生命に危険が生じる。例えば、気道内圧が低すぎると体内への酸素供給が不十分となり、反対に気道内圧が高すぎると肺泡が破れる危険性がある。各々の患者の呼吸システムの特性を知り、その患者に合った換気条件の設定が求められている。

一方、医療現場においては、患者の体重を参考にして呼吸の気道内圧上限値を設定するなど人工呼吸の換気条件の設定は大ざっぱで、個々の医師が自らの経験や勘によって行うのが現状であり、研修医はもちろんのこと、ベテランの医師もその設定に迷いが多い。特に、早産による未熟児の場合は、呼吸系の発育程度が大きく違うので、人工呼吸の換気条件の設定は難しい判断をしなければならない。我々がこの課題に注目したのも、数年前のあるベテランの小児科医からの相談がきっかけである。

呼吸システムのダイナミクスを表すモデルとしては、従来から1階線形微分方程式モデルや数種類の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、本来エラスタンスに存在する非線形特性を表すことが出来ず、その飽和特性に基づく気道圧力上限値の設定は原理的に無理である。十数年前、肺のエラスタンスの非線形性に注目し、これを体積の多項式で表現した非線形回帰モデルが提案されているが、呼吸の動特性を十分に表現できず、結果的に信頼できるエラスタンスの推定が得られなかった。また、患者の呼吸システムの特性によって自動的に適切な換気条件を推定する理論的整備がなされていなかった。

このような状況を踏まえ、我々は「人工呼吸における医療支援システムの開発」、「呼吸システムの実用的数理モデルの構築方法とその人工呼吸への応用」、「人工呼吸における非線形動的モデルの構築と最適換気条件の決定」といった課題を立案し、約十年間の研究を経て、エラスタンスとレジスタンスの多項式またはRBFネットワークの表現による非線形微分方程式モデルを提案し、それらのモデルの推定や得られたモデルに基づく気

道内圧上限値の決定について一定の知見を得ている。研究が深まるにつれ、エラスタンスのヒステリシスを考慮した呼吸システムのモデリング、呼吸システムの複雑性による周期再現不完全性への対処、呼吸ダイナミクスの時間特性の表現と推定、呼吸状態を判別する評価基準の確立と換気条件を決定する実用的方法の開発などの問題が明白になり、本研究ではこれらの問題の解決策を開発したい。

2. 研究の目的

人工呼吸は人間の呼吸という基本的な生命維持機能を肩代わりする重要な医療措置である。それにもかかわらず、呼吸の換気条件は患者の体重を目安に医師の経験や勘によって設定しているのが現状である。本研究は、呼吸システムのモデリング手法を確立し、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、それぞれの患者に似合う換気条件を適切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監視制御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。本研究においては、これまでの研究を踏まえ、新しい人工呼吸監視制御のためのモデリング手法や換気条件の設定方法を具体的に提案することが目的である。

3. 研究の方法

研究目的を達成するために、研究課題

(1) 肺エラスタンスのヒステリシスを表現可能な呼吸系のモデル構造とその推定方法の提案；

(2) 周期再現不完全な呼吸の実測データにも対応できるロバストなパラメータ推定法の開発；

(3) 患者の病状の変化に追従できる適応型オンラインパラメータ推定法の開発；

(4) 本システムに適した測定データのオンライン前処理技法の開発；

(5) 準静的P-V曲線に基づく、気道内圧上限値の決定法の確定；

などの各サブテーマに分け、研究協力者の協力を得ながら、それぞれのサブテーマ別に必要な要素技術を考案し、数値シミュレーションや試作機上の実験を通して、提案手法の有用性・有効性を検証する。研究推進のため、研究代表者と研究分担者・研究協力者は普段の緊密な連携に加え、研究開発の局面に応じて研究討論会を開き、本研究に関する意見交換や技術交流を行う。

4. 研究成果

(1) アントコロニー最適化手法によるファジィ呼吸モデルの推定手法。以前の研究にお

いて人工呼吸器の気圧上限値設定に必要とされる静的 P-V 曲線はファジィロジックを用いて求めることを提案している。しかしながら、ファジィモデルに用いるファジィ変数の設定は通常経験者の勘などによって試行錯誤で決められるものであった。1分1秒を争う医療現場においてファジィ変数を手動で設定することは避けるべきで、ここは最適なファジィ変数を自動的に設定するアルゴリズムが必要である。本研究では、患者のエラスタンスファジィ表現で用いるファジィ変数をアントコロニー手法により最適化する手法を提案した。患者の実データを用いたファジィ変数の最適化実験では、集団としての多様性を保持しながら探索を行い、手動設計で作成したファジィ変数を採用するより推定精度の良いことが確認できた。(論文、学会発表)

(2) ファジィ呼吸モデルの繰り返し推定手法の開発。本研究では、ファジィロジックを用いて肺のエラスタンス項を持つ呼吸モデルの推定において、繰り返し推定アルゴリズムのループ内にファジィ変数探索アルゴリズムを組み込み、ファジィ変数の自動設計を行っている。患者の実データを用いた推定実験では、手動設計で作成したファジィ変数より推定精度の良い結果を得ることが出来た。(論文、学会発表)

(3) ファジィ呼吸モデルにおける初期値設定の提案。ファジィ呼吸モデルの繰り返し推定アルゴリズムにおいて、ファジィ変数の初期値が後の最適化の結果に大きな影響を与えていることは容易に推測できる。本研究では、ランダム最適化手法によるファジィ変数の事前調整プロセスを導入し、呼吸モデル推定精度の向上を実現している。(学会発表)

(4) データの異なる重みを考慮したファジィエラスタンスモデルの推定手法の提案。呼吸サイクルにおいて、データを時間均等に記録していることが一般的であるが、一部のデータは呼吸ダイナミクスに関する情報を多く持っており、そのほかのデータは比較的情報が乏しく、モデルの推定にデータの大事さに差がある。どの部分のデータがより大事であるかは医学的知見から事前に知ることができ、モデル推定に活かせば推定の効率化と高精度化が期待できる。本研究では、ファジィ変数の信頼度という概念を導入してデータの重要度を評価し、測定データに重みをつけて推定する。このような手法によって、より適格な推定結果が得られる。実際の臨床データを用いた実験でも本手法の有効性が確認できている。(学会発表)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文](計4件)

中道正紀、金江春植：肺エラスタンス推定におけるファジィ変数最適化手法の改良、福井工業大学研究紀要、Vol. 45, pp.31-38, 査読なし, 2015.

Masanori Nakamichi, and Shunshoku Kanae: Estimation of the pulmonary elastance using a recursive parameter estimation method and setting of the ventilation condition using fuzzy logic, Transactions of the institute of systems, control and information engineers, Vol. 27, No. 12, pp.469-475, 査読有り, 2014.

中道正紀、金江春植：繰り返し最適化手法による肺エラスタンスの推定精度の改善、福井工業大学研究紀要、Vol. 44, pp. 39-46, 査読なし, 2014.

中道正紀、金江春植：ファジィロジックを用いた肺エラスタンスの推定におけるアントコロニー最適化法について、福井工業大学研究紀要、Vol.43, pp.29-36, 査読なし, 2013.

[学会発表](計6件)

M. Nakamichi, S. Kanae and K. Wada: Estimation of the Fuzzy Pulmonary Elastance Model in Consideration of the Data's Weight, The 47th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS'15), Honolulu, Hawaii (USA), December 05-08, 2015.

S. Kanae, M. Nakamichi, L. Jia and X. Li: Improved Identification Method of Pulmonary Elastance Fuzzy Model Based on Pre-adjustment of Membership Functions, SICE Annual Conference 2015 (SICE 2015), Hangzhou (China), July 28-30, 2015.

金江春植、中道正紀、和田清：肺エラスタンスファジィモデル同定における繰り返し推定アルゴリズム、第57回自動制御連合講演会、ホテル天坊(群馬県)、11月10-12日、2014.

M. Nakamichi and S. Kanae: A recursive parameter estimation method for identifying respiratory systems, The 33th Chinese Control Conference (CCC 2014), Nanjing (China), July 28-30, 2014.

M. Nakamichi, S. Kanae and K. Uosaki: Estimation of the pulmonary elastance and setting of the ventilation condition

using fuzzy logic, The 45th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS'13), Okinawa (Japan), November 01-02, 2013.

S. Kanae and M. Nakamichi: An ant colony optimization method for fuzzy membership functions and its application to estimate the pulmonary elastance, The 32th Chinese Control Conference (CCC 2013), Xi'an (China), July 26-28, 2013.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

金江 春植 (Kanae, Shunshoku)

福井工業大学・工学部・教授

研究者番号: 9 0 2 7 4 5 5 5

(2)研究分担者

中道 正紀 (Nakamichi, Masanori)

福井工業大学・工学部・講師

研究者番号: 7 0 7 3 6 1 1 5

(3)連携研究者

()

研究者番号: