

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年05月31日現在

機関番号：33401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560408

研究課題名（和文） 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

研究課題名（英文） Construction of nonlinear dynamical model for artificial respiration and optimal decision of ventilation conditions

研究代表者

金江 春植（KANA E SHUNSHOKU）

福井工業大学・工学部・教授

研究者番号：90274555

研究成果の概要（和文）：

本研究は、人工呼吸の知的モニタリングのための呼吸モデリング方法の構築と最適換気条件の決定方法の開発を目的として、呼吸システムの非線形動的モデルを提案し、そのパラメータの推定方法を与え、さらにその人工呼吸への応用について研究開発を行った。呼吸系の特性やモデルの運用等を勘案し、エラストランスにヒステリシスを持つ呼吸モデルとそのパラメータの推定法、呼吸の摂動と計測ノイズを考慮した呼吸モデルの周期的推定法、GAを用いた呼吸モデル構造の決定法、呼吸システムのファジィモデルとそのパラメータの推定法およびファジィメンバシップ関数のアントコロニー最適化法などを提案し、呼吸システムのモデリングの枠組みを構築し、人工呼吸の知的モニタリングのために明るい見通しをつけた。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this project is to establish modeling methods of respiratory systems and to develop decision methods of optimal ventilation conditions for intelligent monitoring of artificial respiration. In this project, nonlinear dynamical models of respiratory systems are proposed and its parameter estimation methods are given, furthermore developments of applications to artificial respiration are performed for this purpose. Taking features of respiratory systems and usages of the models into consideration, respiratory model with hysteresis elastance and its parameter estimation algorithm, respiratory model considering breath perturbation and measurement noise and its periodical parameter estimation algorithm, respiratory model structure decision method by using GA, fuzzy model of respiratory systems and its parameter estimation algorithm, ant colony optimization method of fuzzy membership functions for fuzzy respiratory model, etc. are developed. These developments construct a framework of modeling respiratory systems and give a bright prospect of intelligent monitoring of artificial respiration.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・システム工学

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

心肺停止のような救急の場合のみならず、全身麻酔の必要な手術にいたるまで、幅広く人工呼吸療法が使われている。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可能性がある。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。

しかし、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。

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 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、その非線形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」といった課題を立案し、数年の研究を経て、エラスタンスとレジスタンスの多項式表現による非線形微分方程式モデル、およびエラスタンスとレジスタ

ンスのRBFネットワーク表現による非線形微分方程式モデルを提案し、そ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、オンラインで処理する場合のデータの前処理、呼吸システム複雑性による周期再現不完全性への対処、ヒステリシスエラスタンスを持つ呼吸システムのモデリング、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考えたい。

2. 研究の目的

人工呼吸は、呼吸という生体の重要な機能を肩代わりしている大切な医療法であるにもかかわらず、患者の体重を目安にして換気条件を設定するなど、かなり大ざっぱな運用をしているのが実情である。

本研究は、安全かつ快適な人工呼吸のために、個々の患者の呼吸システムの特性を適時推定し、各々の患者に最良の換気条件を設定できる医療支援システムの構築を目的とし、呼吸システムの数式モデルの構造決定法、数式モデルのパラメータ推定法、呼吸状態の評価法、呼吸の最良換気条件の決定法など、研究期間内にその要素技術の確立を目差している。

3. 研究の方法

研究目的を達成するために、研究課題

- 1) ヒステリシスのエラスタンスを持つ呼吸モデルの構造決定；
- 2) ヒステリシスを含む非線形連続時間モデルのパラメータ推定法の開発；
- 3) 実データの前処理方法の確立；
- 4) 周期再現不完全な多周期データの処理方法の確立；
- 5) 人工呼吸の時間応答特性の評価方法の開発；
- 6) 呼吸の評価方法と最良換気条件の設定法の開発

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、研究代表者と研究分担者がそれぞれのサブテーマを分担して、必要の要素技術を考案し、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、研究分担者および研究協力者は普段の緊密な連絡に加え、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) ヒステリシスを考慮した呼吸モデルとそのパラメータ推定法の開発. 以前の研究においては初期段階として, 静的 P-V 曲線のヒステリシスを無視して呼吸モデルを仮定しそのパラメータの推定を行っていたが, 本来は呼気と吸気の両過程において肺の弾性特性が異なっており, その違いが静的 P-V 曲線のヒステリシスとして現れており, 人工呼吸の気道気圧最大値を決める根拠として P-V 曲線を使うときは事実に沿ってヒステリシスを考慮した推定曲線が望ましい. 本研究では, 呼気と吸気の切り替わる時点で静的 P-V 曲線が同一点を通過することに着目し, 呼気と吸気でそれぞれ異なるパラメータを持つ 2 モデル構造を提案し, 呼気吸気で共通する点を拘束条件として定式化し, 拘束条件付きパラメータ推定法を開発し, 静的 P-V 曲線のヒステリシスを表現可能にしたモデル構造とそのパラメータ推定法を提案した. (学会発表⑩)

(2) 呼吸の摂動と計測ノイズを考慮した呼吸モデル推定法の開発. 呼吸は一見周期活動をするように見えるが, 実は大まかな周期活動を基本としながら呼気吸気の時間・圧力・気量において常に摂動があり, さらに計測ノイズが存在するため, 異なる周期の P-V 曲線が完全に重なることはなく, 各周期で推定される肺の弾性曲線はそれぞれ異なる結果となり, 患者の呼吸システムの特性としてどの推定結果を使用すれば良いか適切な判断をしなければならない. そこでこの問題の解決策として, 適切な周期数に渡りデータ処理をするデータ平均法, パラメータ平均法, 静的 P-V 曲線の平均法を提案し, 比較検討を行った. これらの手法により, 計測ノイズや呼吸の摂動の存在する実測データからも安定した推定結果を得ることができるようになった. (学会発表⑪)

(3) GA を用いた呼吸モデルの構造決定法の開発. 呼吸モデルとして肺エラスタンスの表現形式により多項式表現型モデルと RBF ネットワーク表現型モデルが提案されているが, その構造を決めるために, モデルの評価としてベイズ情報量基準 (BIC) を適応度とし, これを GA により最適化する構造決定方法を提案し, 呼吸モデルの構造決定問題の解決を図った. (学会発表④, ⑦)

(4) 呼吸システムファジィモデルの提案. 人工呼吸医療支援システムの全体の開発を考えると, 呼吸時の計測データから換気条件を決定する推論や多くの患者からの収集データをもとにシステムを更新・メンテナン

スする場合ファジィ推論が魅力的であり, そのときに呼吸システムのモデルもファジィ形式の方が, 整合性が良い. 本研究では, 関数型 SIRMs ファジィ推論法を用いて肺エラスタンス部分をモデル化し, モデル全体を非線形連続時間システムとしてそのパラメータの推定法を提案した. (雑誌発表①, ③; 学会発表②, ⑤, ⑥, ⑧)

(5) 呼吸システムファジィモデルのアントコロニー最適化法の提案. 呼吸のファジィモデルにおいて気量 V 領域に定義されたファジィメンバシップ関数をもとにエラスタンス関数を推論するわけであるが, そのメンバシップ関数の初期値はデータ処理の経験により一定の範囲で決めることが可能であるが, その調整法が課題となっていた. 本研究では, 群知能による最適化手法として知られるアントコロニー最適化手法を導入し, (4) で提案したファジィ呼吸モデルを最適化する方法を提案した.

(6) 非線形動的モデル Hammerstein モデルの推定法の改善. Hammerstein モデルの出力にランダムノイズが存在する場合について, ウェブレットで入出力データを分解し, モデルのパラメータを推定する方法を提案した. モデルの静的非線形部分は入力多項式で表現し, 後ろの線形動的部分は ARMAX モデルとなる. 本手法は時間領域の最小二乗法と比較して優れていることが数値シミュレーションで確認されている. (学会発表③)

(7) 線形モデルのバイアス補償法の統一枠組みの提案. 本研究では, ある正則なマトリクスとノイズと無相関の補助変数ベクトルを導入することにより, バイアス補償の統一的な枠組みを構築した. この枠組みのもとでは既存のバイアス補償法は本提案の統一枠組みの特例であることが明らかになった. (雑誌論文②)

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)

- ① 中道正紀, 金江春植: ファジィ推論法の後件部関数表現形式による静的 P-V 曲線推定への影響について, 福井工業大学研究紀要, Vol. 42, pp. 78-83, 2012.
- ② L. Jia, R. Tao, S. Kanae, Z.-J. Yang, K. Wada: A unified framework for bias compensation based methods in correlated noise case, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 56, No. 3, pp. 625-629, 2011.
- ③ 中道正紀, 金江春植: ファジィス推論法

を用いたエラストランスと静的 P-V 曲線の推定, 福井工業大学研究紀要, Vol. 41, pp. 82-88, 2011.

- ④ 金江春植: 呼吸システムのモデリングと人工呼吸の換気条件の設定について, 計測と制御, Vol. 49, No. 07, pp. 485-488, 2010.

[学会発表] (計 11 件)

- ① 中道正紀, 金江春植: アントコロニー最適化手法を用いたエラストランスのファジィ推定におけるファジィ変数の決定について, 第 55 回自動制御連合講演会, pp. 1243-1246, 京都, November 17-18, 2012.
- ② M. Nakamichi, S. Kanae, Z.-J. Yang and K. Wada: Estimation of Pulmonary Elastance Fuzzy Model by Data Combination of Two Respiration Phases, The 2012 UKACC International Conference on Control (UKACC Control 2012), Cardiff, UK, September 3-5, 2012.
- ③ Z.-Q. Li, W.-G. Luo, H.-T. and S. Kanae: Parameter Estimation of Hammerstein Model Based on Wavelet Packet, The 31st Chinese Control Conference (CCC' 2012), Hefei, China, July 25-27, 2012.
- ④ 中村隆之, 金江春植: GA による呼吸モデルの構造決定について, 第 54 回自動制御連合講演会, pp. 1394-1397, 豊橋, November 19-20, 2011.
- ⑤ 中道正紀, 金江春植: 関数型 SIRMs ファジィ推論法による肺エラストランス推定の後件部関数表現形式について, 第 54 回自動制御連合講演会, pp. 1398-1401, 豊橋, November 19-20, 2011.
- ⑥ 中道正紀, 金江春植: ファジィロジックを用いた肺エラストランスの推定について-後件部関数の表現形式に関する一考察-, 平成 23 年度電気関係学会北陸支部連合大会, H-12, 福井, September 17-18, 2011.
- ⑦ 中村隆之, 金江春植: GA を用いた多項式表現型呼吸モデルの構造決定, 平成 23 年度電気関係学会北陸支部連合大会, H-13, 福井, September 17-18, 2011.
- ⑧ M. Nakamichi, S. Kanae: Estimation of Pulmonary Elastance by Functional Type SIRMs Fuzzy Reasoning Method, The 30th Chinese Control Conference (CCC 2011), Yantai, China, July 22-24, 2011.
- ⑨ 沈麗麗, 金江春植, 和田清: Hammerstein OEAR システムの補助モデルを用いた最小二乗同定法, 第 63 回電気関係学会九州支部連合大会, p. 365, 福岡, September 26-27, 2010.
- ⑩ S. Kanae, M. Nakamichi, Z.-J. Yang, and

K. Wada: A New Respiratory Model Considering Hysteresis for Artificial Respiration, The IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing (ALCOSP 2010), Antalya, Turkey, August 26-28, 2010.

- ⑪ S. Kanae, M. Nakamichi, Z.-J. Yang, and K. Wada: Pulmonary Elastance Estimation Considering Respiratory Periodicity, The International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP 2010), pp. 106-111, Dalian, China, August, 2010.

[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

和田 清 (WADA KIYOSHI)
九州大学・水素エネルギー国際研究センター・特任教授
研究者番号: 6 0 1 2 5 1 2 7

(3) 連携研究者

()

研究者番号: