

ボルテラ級数を応用した呼吸制御系の設計

○ 若松 秀俊

東京医科歯科大学 医用器材研究所

Design of control systems using Volterra series

Hidetoshi Wakamatsu
Institute for Medical and Dental Engineering,
Tokyo Medical and Dental University

1. はじめに

人工呼吸による血中炭酸ガス濃度の制御の医学的な要請条件は、临床上の目的によって異なる。開胸時や筋弛緩剤使用時など、陰圧呼吸が不可能な場合や自発呼吸介助の場合には、生理的な調節能力に見合う緩やかな血中炭酸ガス濃度の制御で十分である。一方、心肺機能に予備力のない患者の手術時には生命維持のために、これを精度よく制御する必要がある。これまでに行なわれてきた人工呼吸制御の大部分は、呼吸器系の線形近似モデルを基にした制御方式によるものであり、内部に未知の構造やパラメータの変動を含むこうしたシステムについて、有効な非線形モデルが使われていない。そこで、本研究では呼吸器系を表わす非線形数式モデルとして、線形系を含む広範囲な非線形系の入出力関係を一般的に表現できるボルテラ級数を採用する。すなわち、内部状態に立ち入らずに、入出力関係のみ記述できるとした非線形表現の呼吸器系に関して、入出力情報だけを用いて、前述の医学上の要請条件にあった呼吸制御系をそれぞれ異なる方法で設計し、それらの特性を検討する。

2. ボルテラ級数による呼吸器系の記述

ここでは、神経支配やホルモンなど化学物質の影響を考えずに、呼吸制御の本質に係る重要な部分のみについて、対象とする呼吸器系の記述を行なう。すなわち、肺泡、動脈区画および静脈、組織区画に注目して、望ましい状態（平衡点）の周りで、肺泡換気量と体組織中の代謝量を入力変数、肺泡炭酸ガス濃度を出力変数とする呼吸器系を離散時間ボルテラ級数で表記する。

3. 入力再現法に基づいた呼吸制御系の設計

代謝量の変動があっても、肺泡炭酸ガス濃度が目標値に追従できるような制御を入力再現法に従って行なう。この方法は、外乱（ここでは代謝量の変動分）を制御対象（呼吸器系）へのひとつの入力とみなし、入力観測器を用いて理論的に、これを再現しながら、外乱の制御量（肺泡炭酸ガス濃度）への影響分を算出し、肺泡換気量を制御入力として用いることによって、これを補償するものである。この呼吸制御系が十分な精度と速応性をもって、目標値を実現できる特性をもつことを確認した。

4. 部分的モデルマッチングによる呼吸制御系の設計

呼吸器系については、その部分的な知識しか得られず、代謝量の変動分に関する特性および4次以上の高次非線形項に関する知識が全く得られないものとした。制御対象のこうした不完全な知識のみを基にして、Schetzenのp次逆システムを構成した。また参照モデルとしては、分母系列表現のKitamoriの標準伝達関数を用いた。この制御系について、肺泡炭酸ガス濃度を制御量とする非線形制御系を縦続補償とフィードバック補償によって設計した。参照モデルのパラメータと積分動作の利得を調節することによって、非線形成分の寄与分を等価的に線形成分に含めた形で、基本的な特性に関して部分的なモデルマッチングを行ない、制御系全体の入出力特性を望ましい特性にすることが可能であった。

5. おわりに

本研究は、心肺機能に予備力のない患者の手術時など、肺泡炭酸ガス濃度を所望の目標値に精度よく制御する必要があるときに、またパラメータ変化があってもロバスト性のある制御が必要であるときに、それらに適合する人工呼吸制御法則を確立することを目的としたものであった。その際に、制御対象の内部の状態を知り得ず、入出力関係のみを知り得る場合を想定した。このことは、呼吸調節系のように、内部構造や状態に未知のものを多く含むものであって、入出力関係、すなわち外部記述でしか表現できない非線形システムについて、制御理論を臨床に応用するうえで、重要である。その理由は、一般に非線形の特性をもちながら、しかもそれを特徴づけるパラメータが時間とともに変化したり、個体によって異なるなど、正確な値を把握することが困難な制御対象の場合でも良好な制御系の設計が可能であることにある。すなわち、多大の時間を費やすような個々の患者の事前のパラメータ同定を必要とせず、平均的なパラメータの値を用いて、生体サブシステムの目的に合った制御系の設計が本方法により、原理的に可能になるからである。

文献

- 1) 若松他：医用電子と生体工学, 19, 438/441(1981).
- 2) Wakamatsu: Proc. IFAC Symp. Theory & Appl. Digital Control, 223/228(1982).
- 3) Wakamatsu et al.: Prepr. IFAC 9th World Congr., 2, 58/63 (1984).