

○ 若松 秀俊 (足利工業大学 電気工学科)

1. はじめに

健康というものを、何らかの意味で複数の望ましい状態の組み合わせの集合によって表されるものと考え、健康の管理とはそれらの状態の組み合わせの維持またはそこからの移動であるとする。この意味で健康管理は制御対象を人間とする、広い意味でのシステム制御である。健康の問題を扱う場合は常に生きている人間の生理学的、心理学的特性を相手として考える必要がある。従って、これを表現する適当な手段があれば、工学で用いられる概念の類似性から、システム制御の方法に関する理論を健康管理の諸活動にまで浸透させ、それを日常的なレベルで応用することが原理的に可能である。それにはその方法がより具体的な例について有効であることを示す必要がある。そのために著者はわかりやすい生体制御の例として、生理学的な現象に限定はしているものの、人工呼吸制御を採りあげた。こうした生体の調節系の制御も、構造が不変でもパラメータに個体差や経時変化があって、明確にその値を知ることができないために、既存の制御理論の適用ができず、非線形の影響もあって調節機能が一部満足に働かないような軽微な不調時でさえも、それを制御するシステム設計が事実上不可能な場合が少なくない。ここではこうした生体の調節系の特質を考慮して、非線形数学モデルとしてボルテラ級数を用い、これをさらに推し進めた形で非線形適応制御によって個別性と時間変化性の問題が克服できることを示す。そして、呼吸器系の特性に関してわずかな知識しか得られない場合に限定しても、予知できない代謝量の変動の影響に抗して、肺胞炭酸ガス濃度を望ましい特性に追従させることが可能であることを述べるとともに、これが健康管理における制御理論の応用の第一歩になり得ることを述べたい。

2. 人工呼吸制御系の目的と方法の概略

まず、制御対象である呼吸器系に関する数学モデル化が不可欠である。これがシステム理論という同定であり、これを行う方法が同定則である。具体的には呼吸器系に影響をおよぼす複数の因子を人力とし、適当な状態量で表す呼吸器系の指標を出力とし、これらの物理量をもとに数学モデル化を行うことである。呼吸に関連するダイナミクスを予測しながら目的に沿った適切な変更を行うことがシステム制御である。これを行うために必要な機能をもたせることが制御系の設計であり、実際に操作を行うための規則が制御則といわれる。これらの一連の手続きを一般的に扱うことが可能であって、しかも個体差があっても自動的にこれを検知して対応できる論理を備えている制御方式を必要とする。ここでは計測技術の存在を前提として、①追及すべき望ましい状態を規範モデルの特性とした非線形制御を行う。その際に②個体による、また経時変化によるパラメータの違いに起因する特性の劣化に対して③自動的に制御系を修正設計しながら、望ましい特性になるように操作量を加えることにより目的に応じた個別的な生体の機能制御が理論上可能であれば、原理的には専門家の手を経ないで、どんなひとにでも行い得る客観的操作方法が可能である。ところで、近年、理論的に大きな進歩をみた、生物の適応能力をシステム制御に概念的にとり入れた適応制御理論では、システムの特性が変化しても制御系全体の特性を与えられた規範モデルの特性に適応的に合わせる方法を明らかにしている。その概要は①システム同定と制御系の設計を同時に自動的に、②制御系の評価をフィードバックして、制御系を修正設計するものである。これまでのフィードバック制御は制御対象の十分な認識を基礎にしたもので外乱に対処した制御法であるのに対して、適応制御は制御対象の不十分な認識を基礎として動特性変化(パラメータ変動)に対処した制御理論である。したがって、追及すべき望ましい状態を、規範モデルの特性と考えるならば、生体特有の個体による、また経時変化によるパラメータの違いに起因する特性の劣化についても、自動的に制御系を修正設計しながら対応できることになり、この理論が積極的な健康維持・管理の考え方と共通するものになる。

3. 呼吸器系の特性に関する部分的知識を基にした適応制御系

3.1 離散時間ボルテラ級数による呼吸器系の記述
これまで行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、適切な非線形モデルが使われていない。ここでは、呼吸器系を表す非線形数学モデルとして、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用いることにする。対象とする呼吸器系のうち、ここで注目する未知の代謝量 m および肺胞換気量 U_1 が肺胞炭酸ガス濃度 x に分数調波を持たない非線形関係で影響を与えるものとする。それぞれの平衡点 x_0, u_0, m_0 からの変動分を新たに x, u, m と置きかえ、さらに X_1, U_1, M_1 のように離散時間で表示し、

$$X_{t+1} = H(U_t, M_t, u_0, m_0) \quad (1)$$

なる非線形関係 H を仮定する。これは入力 U_t, M_t に関して高次の非線形項を含む。しかしながら、代謝量の変動分は測定困難であることからこれを未知とすれば、その肺胞炭酸ガス濃度の変化への寄与も未知である。ここでは、未知の外乱(代謝量の変化分 M_t) の

肺胞炭酸ガス濃度 X_t への寄与分を肺胞換気量 U_t のパラメータ変動による肺胞炭酸ガス濃度 X_t への寄与分の変化とみなすことにする。この際、我々の認識にはおのずと限界があり、制御対象について得られる知識はさらに不完全なもので、部分的なものであるとする。すなわち、(1)式の肺胞換気量の高次の非線形寄与分を全く認識できないものとみなして呼吸器系の数学モデルとして、

$$X_{t+1} = \sum_{i=0}^p h_i U_{t-1} + \sum_{i=0}^q \sum_{j=1}^q h_{ij} U_{t-1} U_{t-1-j} + \sum_{i=0}^r \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r h_{ijk} U_{t-1} U_{t-1-j} U_{t-1-k} \quad (2)$$

のような有限項からなるボルテラ級数を考える。これは構造に関する僅かな知識に過ぎないが、この部分的な知識を基にして表現した呼吸器系に関して、内部状態に立ち入らずに入出力情報だけを用いて、パラメータ変化に対して適応的に対応できる人工呼吸制御系を設計する。それによって、代謝量の変動があっても、医学的要請条件に従って、肺胞炭酸ガス濃度が目標値に追従できるような制御が可能になる。以下では、(2)式を基にしたモデル規範形適応制御系の構成法を述べる。規範モデルとしては、医師の経験からみて望ましいと考えられる応答を規範出力 X^* の形で与えるとする。

3.2 呼吸器系モデルのパラメトリック表現

(2)式で与えた呼吸器のモデルは $f(U_t) = h_0^{(0)}(U_t)^3 + (h_0^{(1)} + \theta_1^T \xi_{2,t})(U_t)^2 + (h_0^{(2)} + \theta_2^T \xi_{1,t})(U_t)$ とすれば、 $X_{t+1} = f(U_t) + \theta_0^T \xi_{0,t}$ である。したがって、適応入力 U_t は $f(U_t) + \theta_0^T \xi_{0,t} + \theta_{0,t}^T \xi_{0,t} - X_{t+1}^* = 0$ で与えられる。ただし、 $\theta_{0,t}$ は時刻 t におけるパラメータの推定値、 $f(U_t)$ は(3)式の $f(U_t)$ の θ_1, θ_2 を推定値 $\theta_{1,t}, \theta_{2,t}$ で置き換えたものである。また、推定パラメータを用いて、誤差モデルを $e_{t+1} = f(U_{t+1}) + \theta_{0,t+1}^T \xi_{0,t+1} - X_{t+1}^*$ と書き表せば、同定誤差として

$$e_{t+1} = X_{t+1} - X_{t+1}^* = f(U_t) + \theta_0^T \xi_{0,t} + \theta_{0,t}^T \xi_{0,t} - X_{t+1}^* \quad (4)$$

を得られる。ただし、 $\theta_1^T = [\theta_1, h_0^T, \theta_2^T, h_0^{(0)}, \theta_1^T, h_0^{(1)}, \theta_2^T, h_0^{(2)}]$ とし、また時刻 t におけるその推定値を $\theta_{1,t}$ とすれば、 $\phi_t^T = [\theta_1^T - \theta_{1,t}^T, \xi_{1,t}^T = [\xi_{1,t}^T, U_t, \xi_{2,t}^T, U_t^2, U_t^3]^T$ である。このとき、パラメータ調整則として、 $\theta_{1,t} = \theta_{1,t-1} + \Gamma_{t-1} \xi_{t-1} e_t$ を与えれば、誤差システムの安定性が保証される。

3.3 非線形適応制御系の構成の概要
出力誤差を e_t とすれば、

$$e_{t+1} = X_{t+1} - X_{t+1}^* = f(U_t) + \theta_0^T \xi_{0,t} + \theta_{0,t}^T \xi_{0,t} - X_{t+1}^* \quad (4)$$

を得られる。ただし、 $\theta_1^T = [\theta_1, h_0^T, \theta_2^T, h_0^{(0)}, \theta_1^T, h_0^{(1)}, \theta_2^T, h_0^{(2)}]$ とし、また時刻 t におけるその推定値を $\theta_{1,t}$ とすれば、 $\phi_t^T = [\theta_1^T - \theta_{1,t}^T, \xi_{1,t}^T = [\xi_{1,t}^T, U_t, \xi_{2,t}^T, U_t^2, U_t^3]^T$ である。このとき、パラメータ調整則として、 $\theta_{1,t} = \theta_{1,t-1} + \Gamma_{t-1} \xi_{t-1} e_t$ を与えれば、誤差システムの安定性が保証される。

3.4 おわりに
本稿では健康状態の制御と非線形適応制御系の概念が共通であることに注目して、明確な記述が困難で経時変化する健康に関する諸現象を制御量とすると、規範モデルで与えた望ましい状態に追従させるような操作を行う方法を具体的に呼吸器系の制御を通して説明した。この非線形モデル規範形適応制御方式の特徴は、医師の与える望ましい特性を実現するような肺胞換気量をシステム同定を行いながら自動的に算出することによって、呼吸器系に関する知識については、その構造に関する概略がよく、初期値・パラメータは未知でも差し支えないことである。非線形数学モデルとして、ボルテラ級数を採用することによって内部状態に立ち入らずに、入出力情報だけを用いて制御が可能である。その結果、これまでの方法と比較して呼吸器系に関する知識をより必要としないような制御系の構成が可能になり、呼吸器系の構造に関するわずかな知識だけを仮定しさえすれば、代謝量の変動があっても与えられた望ましい特性が適応的に実現できることがわかった。すなわち個別的な生体の機能制御が生体の適応能力に立脚した制御方法によって、原理的に可能であることを述べた。この考え方は、生体現象のように非線形現象であって、しかもその特性を特徴づけるパラメータの個体差や経時変化のために正確な挙動を把握することが困難である場合の、または制御対象の不完全な知識のみを基にしたシステム制御に適している。このことは健康のための科学的要請条件(規範モデル)に従って、指標となる状態量が目標値に追従できるような制御を概念的に可能とし、ヒトの健康状態の経時変化に対して、個別的にしかも適応的に対応できる制御系として働かせるための理論的構築が可能であることを示唆している。しかし、実際にこの方法を健康問題に適用するには多変数の適応制御を行う必要がある。

4. おわりに

本稿では健康状態の制御と非線形適応制御系の概念が共通であることに注目して、明確な記述が困難で経時変化する健康に関する諸現象を制御量とすると、規範モデルで与えた望ましい状態に追従させるような操作を行う方法を具体的に呼吸器系の制御を通して説明した。この非線形モデル規範形適応制御方式の特徴は、医師の与える望ましい特性を実現するような肺胞換気量をシステム同定を行いながら自動的に算出することによって、呼吸器系に関する知識については、その構造に関する概略がよく、初期値・パラメータは未知でも差し支えないことである。非線形数学モデルとして、ボルテラ級数を採用することによって内部状態に立ち入らずに、入出力情報だけを用いて制御が可能である。その結果、これまでの方法と比較して呼吸器系に関する知識をより必要としないような制御系の構成が可能になり、呼吸器系の構造に関するわずかな知識だけを仮定しさえすれば、代謝量の変動があっても与えられた望ましい特性が適応的に実現できることがわかった。すなわち個別的な生体の機能制御が生体の適応能力に立脚した制御方法によって、原理的に可能であることを述べた。この考え方は、生体現象のように非線形現象であって、しかもその特性を特徴づけるパラメータの個体差や経時変化のために正確な挙動を把握することが困難である場合の、または制御対象の不完全な知識のみを基にしたシステム制御に適している。このことは健康のための科学的要請条件(規範モデル)に従って、指標となる状態量が目標値に追従できるような制御を概念的に可能とし、ヒトの健康状態の経時変化に対して、個別的にしかも適応的に対応できる制御系として働かせるための理論的構築が可能であることを示唆している。しかし、実際にこの方法を健康問題に適用するには多変数の適応制御を行う必要がある。

参考文献

- 1)若松:生体の機能制御の試み -人工呼吸制御への非線形制御理論の応用を通して- 第一回日本健康科学学会大会予稿集, 11 (1985).
2)若松:モデル規範形適応制御によるボルテラ級数を用いた呼吸制御系の設計. 計測自動制御学会論文集, 22, 791-793 (1986).