

B-24 シミュレーションによる人工呼吸装置の換気量特性の解析

○梅垣育裕・高原健爾・須田治彦・若松秀俊 (福井大学 工学部)

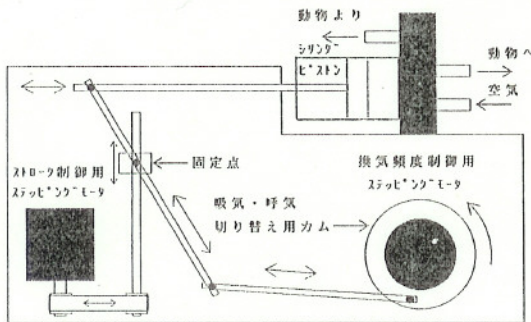
1 はじめに

患者の肺胞炭酸ガス濃度が何らかの原因により大きく、または不規則に変動した場合には、医学的要請条件に従い、生理的に安全な変動幅にこれを保つことが必要である。その場合に人工呼吸が行われるが、医師がその装置の操作に煩わされることなく、患者の容体に十分に対処できるように、人工呼吸装置を自動的に操作できるようにする必要がある。しかしながら、一般には患者の呼吸器系に関する特性が未知であるために、医療の現場では人工呼吸装置を用いた治療を行う際に、多くの場合、医師が患者の状態を観察しながら患者に与えるべき換気量を判断し、その操作量を決定している。従って、従来のこうした人工呼吸制御に代わり、個体差や経時変化などに自動的に対応しながら望ましい操作が実現できるような制御法を確立する必要がある。

ここではこうした制御の前提として、任意の制御法則に適合し、換気量ならびに換気波形が任意に設定可能な人工呼吸装置が実現できるかどうか、また、任意の呼吸波形に対して十分に早い追従性が実現できるかどうかを検討する。

2 人工呼吸制御装置について

人工呼吸装置は、米国 HARVARD APPARATUS 社製のシリンダ式の MODEL-683 を原型とし、コンピュータからの信号でステッピングモータを駆動することにより換気量の制御が可能なるように改造した。ただし、ストローク量を変える固定ネジ部およびピストン往復させるクランク部についてはそのまま利用した(第1図)。



第1図 人工呼吸装置機構概略図

3 人工呼吸装置のシミュレーションについて

改造した人工呼吸装置について、換気量がどのように変化するかを知るためにその機構をモデル化した。

3.1 人工呼吸装置の構造の記述

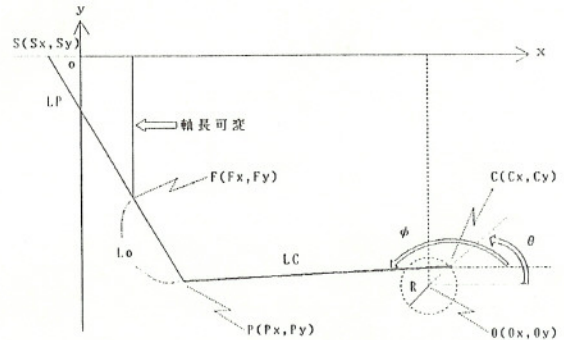
第2図はピストンの軸を X 軸に一致させ、適当に座標を与えて描いた装置の構造図である。図中、下記のように座標やパラメータを定めると関係式(1)~(4)が得られる。

- ・ステッピングモータの中心軸の点 O の座標: $(0_x, 0_y)$
 - ・カムと LC との接続点 C の座標: (C_x, C_y)
 - ・点 O から点 C までの距離(半径): R
 - ・点 O を通る水平軸と OC とのなす角度: θ
 - ・点 C を通る水平軸と LC とのなす角度: ϕ
 - ・LC の点 C の反対側の端点 P の座標: (P_x, P_y)
 - ・LP のスライド位置を決める固定点 F の座標: (F_x, F_y)
 - ・点 P から点 F までの距離: L
 - ・LP 上の点 P の反対側に位置する点 S の座標: (S_x, S_y)
- $$C_x = 0_x + R \cos \theta \quad (1.1), \quad P_x = C_x + LC \cos \phi \quad (2.1)$$
- $$C_y = 0_y + R \sin \theta \quad (1.2), \quad P_y = C_y + LC \sin \phi \quad (2.2)$$
- $$L_o = \{[(P_x - F_x)(P_x - F_x) + (P_y - F_y)(P_y - F_y)]\}^{1/2} \quad (3)$$
- $$S_x = P_x - LP(P_x - F_x)/L_o \quad (4.1)$$
- $$S_y = P_y - LP(P_y - F_y)/L_o \quad (4.2)$$

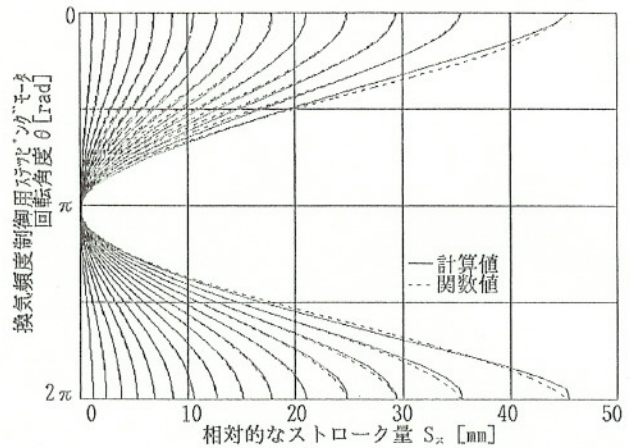
3.2 解析の方法

まず、人工呼吸装置本体の機構を記述するのに必要なパラメータを測定する。次にコンピュータを用いて条件に適合する解を逐次求めることによって、換気頻度制御用ステッピングモータの回転角とストローク量(換気量)との関係を得る。

前項に与えた関係式において、人工呼吸装置は機械的な制約を受ける。この制約条件は動作中、常に点 S が X 軸上に位置することとして与えられる。そこで、 $S_y = 0$ という条件での各変数の値を用いて S_x の値を求めることにより、固定点 F_y の値をパラメータとし、角度 θ に対する相対的なストローク量を知ることができる。すなわち実際の解析では、角度 θ を一時固定し、角度 ϕ を 195.0° から 0.1° ずつ減少させてその都度 S_x を求め、条件に適合した ϕ の値と各変数の値を用いて、ピストンの相対的なストローク量である S_x を求めればよい。計算結果を第3図に実線で示した。ただし、図では、相対的なストローク量を比較しやすくするために、最大点の位置を一致させた。



第2図 人工呼吸装置の幾何学的構造図



第3図 回転角度 θ に対するストローク量 S_x の変化 (ただし、左から順に、 $|F_y|=5, 10, 15, \dots, 75$ である。)

この特性を解析的に利用するために、曲線に合うように固定点 F を決めた場合の角度 θ に対する相対的なストローク量を定める関数を決定した。この関数が得られる曲線を第3図に破線で重ねて表示した。なお、この関数は以下のように与えられる。

$$S_x(|F_y|, \alpha) = 0.5 S_x(|F_y|, 0) (\cos(\alpha) + 1) \times (1 - 10^{-9} |F_y|^{4.4} \sin(\alpha/2)) \quad (\alpha = \theta - 3.2\pi/180) \quad (5)$$

また、 F_y を 5mm 間隔、角度 θ を 10° 間隔としたときの計算値をもとにして、その間にあるストローク量は内挿することにより求められる。

4 人工呼吸装置の換気量の決定について

第3図より、任意の波形に追従させて換気量(ストローク量)を変化させるには、 θ を一定にし、 F_y の値を増減させればよい。この場合、 F_y の値の変化だけでは吸気および呼気の周期を変えることができない。しかしながら、 F_y の値とともに θ の値を変化させることによって換気の周期も任意に変化させることができる。

5 おわりに

本研究では換気特性を使って、任意の換気波形を実現できることが原理的に可能であることを確認した。実際にこれを制御する場合には、パルスの速度と数によって換気特性曲線に従って行うことになる。よって、これに従った制御ができれば、小動物に対してだけでなく、規模の拡大により臨床的にも同様の人工呼吸装置の制御が期待できる。

参考文献

- (1) Wakamatsu, H.: Control of respiratory system using Volterra series. Biomed. Meas. Inform. Control, 2, 25-35(1988).
- (2) Wakamatsu, H.: Application of model reference nonlinear adaptive control method to control of artificial respiration. Proc. 3rd Multinat. Instrum. Conf. 71-75 (1988).
- (3) 高原, 梅垣, 須田, 若松: コンピュータにより換気パラメータが制御可能な小動物用人工呼吸制御装置の開発。電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集(1989)。