

氏名	平山 博史		
授与した学位	博 士		
専攻分野の名称	工 学		
学位授与番号	博乙第 3 5 9 2 号		
学位授与の日付	平成 1 3 年 3 月 2 5 日		
学位授与の要件	博士の学位論文提出者 (学位規則第 4 条第 2 項該当)		
学位論文の題目	最適制御理論による心臓循環動態の機能評価に関する研究		
論文審査委員	教授 加川幸雄	教授 山本尚武	教授 岡 久雄

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

ヒトの病態生理学的循環動態機能を評価する目的で実測されている心室内圧力、容積、大動脈血流量を最適制御理論に基づいてシミュレーションし生体支配則としての最適性の内在を示唆した。また循環動態が変化した場合のシミュレーションを行うことで評価関数に含まれる循環力学的変量に関する重み係数を決定した。心臓血管系の最適性は”一定の血液拍出条件下では動脈血流動態の変動を最小にすると同時に心臓の仕事量も最小にする”と仮定して生物学的、循環動態力学的考察をおこない、つぎの評価関数を設定した。

$$J = \int_0^{T_e} [B(\partial P(t)/\partial t)^2 + q(\partial I_a(t)/\partial t)^2 + \alpha P(t) I_a(t)] dt + \beta P(T_e) \quad \text{---(1)}$$

ここで $P(t)$ は心室内圧(mmHg)、 $I_a(t)$ は大動脈血流量 (ml/sec)、 $P_a(t)$ は動脈血圧(mmHg)、 T_e は駆出終了時刻(sec)である。心臓の外的仕事量は心室内圧と大動脈血流量との積 $P(t) I_a(t)$ を駆出期間 $[0, T_e]$ において時間積分することで近似した。 $P(T_e)$ は駆出終期心室内圧であり、心臓の潜在エネルギーに比例する変量である。 β は心臓の潜在エネルギーに関する重み係数である。まず(1)に示す式に含まれる項を最小化すべき論理的必然性を解説した。評価関数に含まれる変量を制御することの病態生理学的意義として心臓力学的視点、臓器動脈床における血流量の自動制御、動脈における拍動流の周波数、動脈の機械的インピーダンスと拍動流の周波数、血管壁粘弾性と周波数、乱流に関してそれらを適切に制御することと循環動態の最適性との関連を解説した。動脈系は抵抗、キャパシタンスと特性抵抗で代表した3要素ウインドケッセル型動脈モデルをもちいた。実験で報告されている動脈系のパラメータ値、一回血液拍出量、駆出時間、拡張期時間をパソコン上に入力し重み係数 B, α, β を試行錯誤で調節し計算された最高血圧が動物実験の実測値と一致するまでの操作を反復した。シミュレーションは左室内圧力対心室容積が一回の駆出で形成する圧力-容積ループ、左室内圧力、大動脈血流量、ヒト左心室内圧時間経過をシミュレーションし全例成功した。シミュレーションにおける重み係数の調節とそれにもなう心臓血管動態力学的変化が循環系の最適性と矛盾なく説明できた。本研究の新規性は1) 摘出心臓-循環器系から計測された血流、血圧、心室内圧力心室容積関係を最適制御の条件下でシミュレーションに成功した。2) 人で計測された心室内圧力の時間経過をシミュレーションに成功した。3) 最適制御でシミュレーションした場合の重み係数の調節に由来する循環器動態の変動と系の最適性との関係を合理的に説明することができた。工学的実用性では1) 駆出期心室容積の時間経過を計測せずを求めることができ外的仕事量、潜在エネルギーを決定することができる。2) 大動脈血流量の時間経過を計測せずに決定することができる。3) 心機能の指標である収縮終期心内圧力-容積比を決定することができる。4) 経費が極めて安価である。このことで循環器疾患を有する多くの患者の循環動態を患者に苦痛を与えず、非侵襲的にその最適性を定量化できるなど多くの実用性を提案できた。

論文審査結果の要旨

平山博史氏は長期にわたり循環器系の医用工学的研究を行い多くの研究論文を発表して来た。

本研究は循環動態の機械的流体的・電気回路網的等価モデルによるシミュレーションについて過去数年間に発表された8編の論文をまとめたものである。すなわち人の病態生理学的循環動態機能を評価する目的で実測されている心室内圧力、容積、大動脈血流量を最適制御理論に基づいてシミュレーションを行っている。

その結果機械的流体的・電気回路網的等価モデルにおける重み係数を決定すると共に動態が最適性を満たすような生体支配則に従う事を明らかにした。

さらにシミュレーションにおいて調節した評価関数の重み係数を比較する事によって種々の病態における循環器の制御の特徴を明らかにした。

研究は医用工学的成果であるが、これらの知見は、非侵襲的な臨床への応用も可能にするもので実用的価値も高い。

以上の結果から本論文が博士（工学）に値すると認める。