

〔招待論文〕

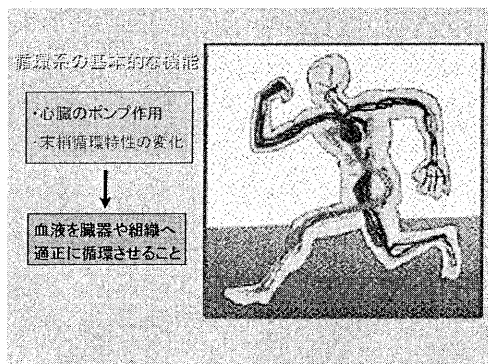
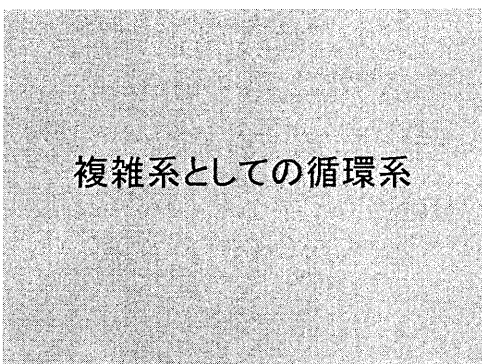
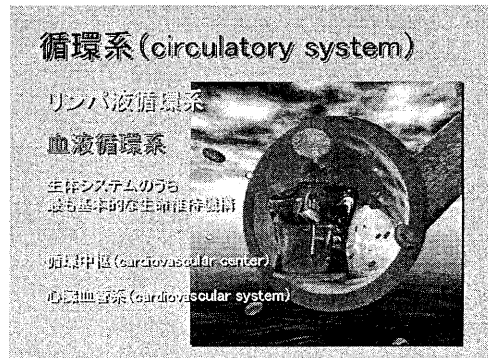
循環系の推定・制御・監視

吉澤 誠

東北大学 情報シナジーセンター 先端情報技術研究部
〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉05電気情報館
E-mail: yoshizawa@ieee.org

あらまし 生体は無数の自動制御系の塊である。それらの機能を十分解明できれば、従来にはない優れた制御機能を持つ工学システムを作り出すことが可能になるかもしれない。ところが、人工心臓のように、生体を人工的なシステムで駆動することを本来の目的とするような場合には、生体システムの機能の解明を待っていては遅く、その前に人工心臓の制御方法を決定しなければならない。本講演では、人工心臓の開発において生じるこのような問題を、これまでどう取り扱ってきたかについて述べるとともに、生体循環系および人工循環系の計測・制御・推定の概要について紹介する。また、インターネットを利用した人工臓器の広域的制御・監視システムの最近の話題についても解説する。

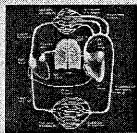
キーワード 生体循環系, 人工心臓, 推定, 制御, 監視, インターネット



循環系 ≡ 水泳プールなどの還流型ろ過装置？

心臓のポンプ作用

血液に運動エネルギーを与える

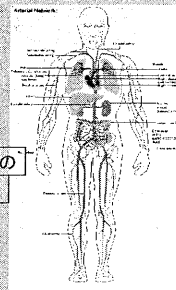


複雑な機構の存在

- ・心室に充満する血液量の決定機構
- ・心室の収縮機構
- ・心室と動脈系との間の相互作用

循環系は大規模非線形非定常分布定数システム

- ・末梢側は血管が無数に分岐
- ・各臓器や無数の組織の特性が非線形でまちまち
- ・血液需要量も時時刻刻変化



脳: 複雑系の最たるもの

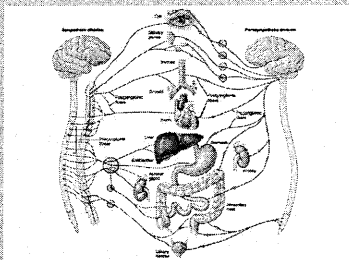
自律神経系の支配

心血管系

自律神経系

相反的2系統制御

交感神経系
副交感神経系



循環制御は階層的でカオティック

- 1) 自己調節機能: 充満量で調節(スターリングの法則)
- 2) 液性制御: 内分泌物質で調節
- 3) 神経系制御: 自律神経系で調節

- ・無数に分布した受容器からの情報で心拍出量を調節
- ・無数に分布した血管を収縮・弛緩させて負荷側の特性を変化させる

心拍数、血圧、血流などの時間的変化を観察した場合、複雑なカオス的ふるまいが現れる

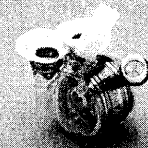
人工心臓の制御

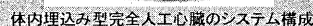
体内埋め込み式完全置換型人工心臓



[http://CNN.com \(2001.12.1\)](http://CNN.com (2001.12.1))

Abiomed社製AbioCore





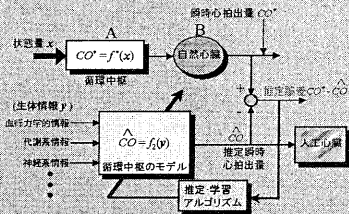
制御工学的検討が必要



重要なのは状態量だが計測不可能なものを含む

心房圧が循環状態のすべてを代表していれば正しい

循環中枢のモデルを用いた循環制御



$f'(x) = f_2(y)$ とはできても、 $f'(x)$ は時変で個体差・種間差がある！
⇒推定誤差は長期間解消されない可能性がある！！

I/R Control Method (Y. Abe)

Peripheral Vascular Resistance-Based Control:
To make the cardiovascular center regulate CO of TAH via peripheral vascular resistance

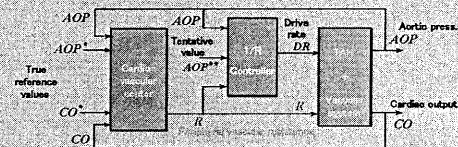
$$CO_{k+1} = (\overline{AOP}_k - \overline{RAP}) R^{-1} + c (\overline{AOP}_k - \overline{AOP}_{k-1})$$

$$DR_{k+1} = CO_{k+1} / SV$$

- Survived for over 500 days in an animal experiment
- No theoretical method for setting control parameters
- Applied only to pulsatile-flow TAH

I/R Control Method (Y. Abe)

Peripheral Vascular Resistance-Based Control

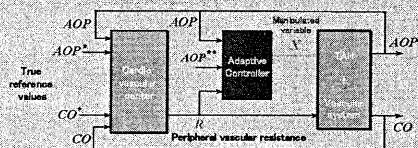


$$CO_{k+1} = (\overline{AOP}^{**} - \overline{RAP}) R^{-1} + c (\overline{AOP}_k - \overline{AOP}^{**})$$

$$DR_{k+1} = CO_{k+1} / SV \quad (SV \text{ is controlled to be constant})$$

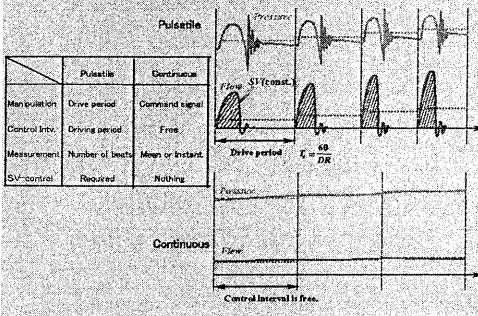
$$R = \frac{SV \times DR_k}{\overline{AOP}_k - \overline{RAP}_k}$$

Peripheral Vascular Resistance-Based Adaptive Control: R-BAC (A. Tanaka and M. Yoshizawa)



- Automatic adaptation to
- Individual difference
 - Time varying characteristics
 - further
 - Independence of type of pump

Differences between pulsatile- and continuous-flow pumps



Controller for a Continuous-Flow TAH

Manipulated variable = Left motor command

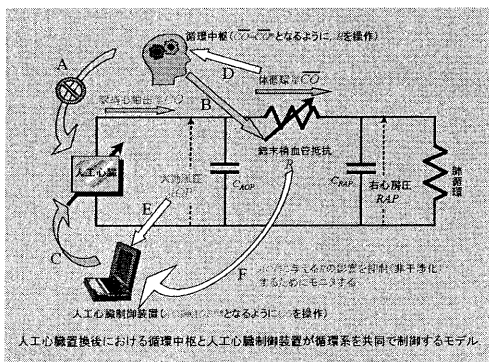
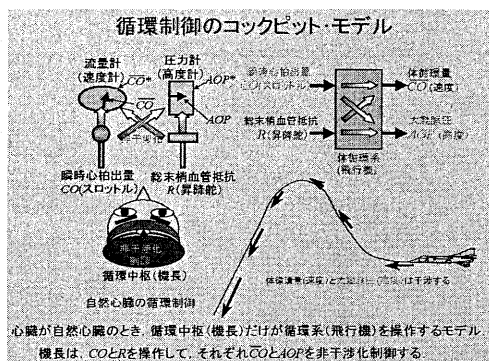
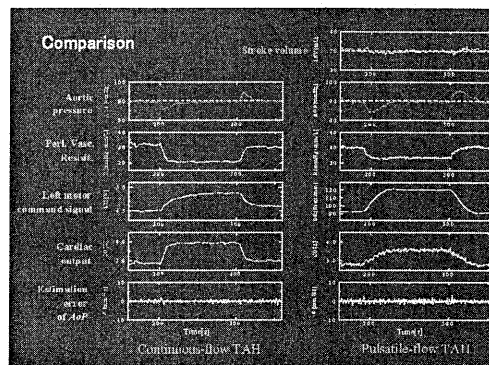
$$LM_k = \frac{\hat{b}_1(k)}{\hat{b}_1(k)^2 + \lambda} \left[\overline{AOP}^* - \hat{a}_1(k) \overline{AOP}_k - \hat{a}_2(k) \overline{AOP}_{k-1} - \left\{ \hat{b}_1(k) - \frac{\lambda}{\hat{b}_1(k)} \right\} LM_{k-1} - \hat{\varepsilon}_1(k) R_k - \hat{\varepsilon}_2(k) R_{k-1} - \hat{d}(k) \right]$$

Peripheral vascular resistance

$$R_k = \frac{\overline{AOP}_k - \overline{RAP}_k}{CO_k}$$

Control interval : 1s

Measurements : Mean value of measured every 10ms averaged over 1s



まとめ

完全置換型人工心臓の左心拍出量制御の制御工学的検討

- ・スターリングの法則に基づいた制御
心房圧が唯一の制御量
心房圧が循環状態のすべてを代表するか？
- ・循環中枢のモデルを用いた制御
循環中枢の時変性・個体差・種間差をどう扱うか
他の出力変数(制御量)を考慮していない
- ・末梢血管抵抗に依存した制御
Rの影響を抑制する大動脈圧の非干渉化制御
⇒Rを媒介とした循環中枢自体による流量制御
代謝情報等を帰還すべきか？

人工臓器はインターネットに直結する

モバイル・コンピュータの概念が根底から覆される

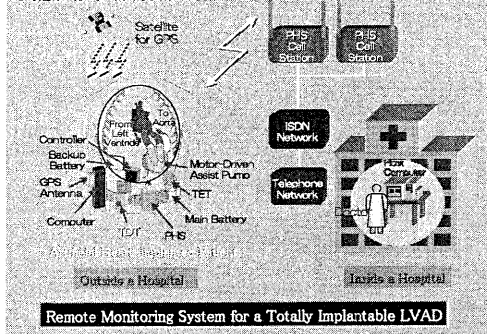
モバイル・コンピュータと家庭用パソコンが、iモードのようなインターネット接続の携帯電話に統合されてしまう

家電製品がインターネットに直接接続されるのも確実

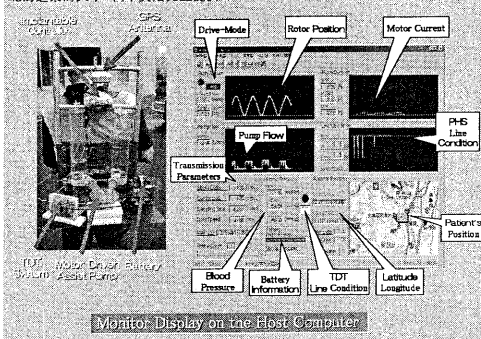
体内に埋込まれる人工臓器もインターネットに直結される

真の意味での「ウェアラブル・コンピュータ」が実現する

北海道東海大学 岡本英治先生提供



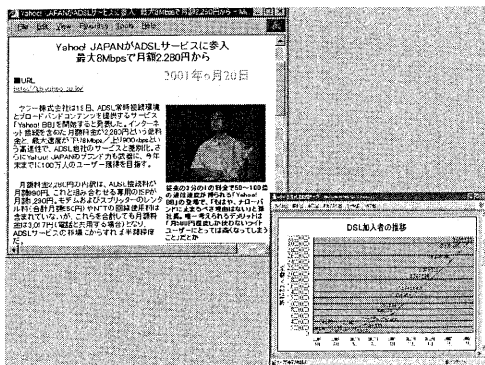
北海道東海大学 岡本英治先生提供



GPSはすでに腕時計サイズになっている。

血圧・心拍数計測可能な腕時計も市販されている。

GPS腕時計



家電製品のインターネット接続の目的

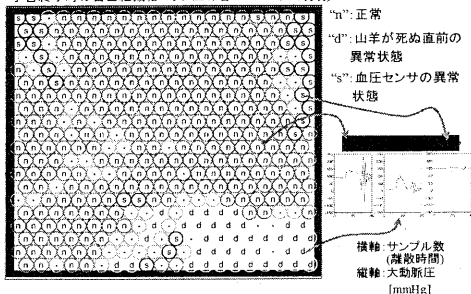
- ・家庭の外からの監視・制御
- ・インターネット上の情報の自動的ローディング
- ・家庭内LAN, 家電同士の情報交換

人工臓器も同様

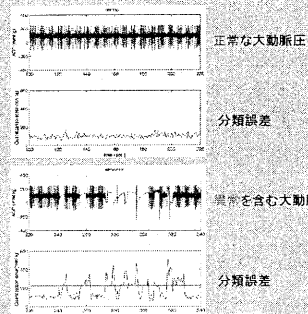


自己組織化マップを用いた人工心臓の自動監視システム

学習終了時の自己組織化マップ上の各ニューロンの分類



学習段階



運用段階

人工臓器は神経に直結する

人工臓器のもう一つの接続先は神経系

人工臓器が神経系と直結

↓

中枢による直接制御が可能

現在は神経再生電極に関する神経接続の
基礎的実験の段階

東京大学 満洲研究室 鈴木隆文博士提供

神経電極の開発 (神経再生型電極)

神経再生型電極の原理

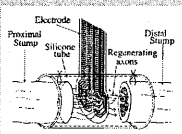
末梢神経系の損傷は切断されると、中枢側より再生する。多数の孔のあいた電極を切断箇所両端に差し入れて再生を待つと、再生軸索に対する信号入出力が可能になる。

原理的検証

- 1) 電極と神経束が物理的、電気的にしっかりと固定されるため、長期間の安定した計測、刺激が可能である。
- 2) 小孔の径を調整することによって1～数本の神経繊維に対する計測、刺激が実現する可能性を有する。
- 3) 従来の金属電極、ガラス管電極では困難な多チャンネル入出力が可能になる。

固定状況

ラット坐骨神経に対する径の込み実験の結果、再生軸索からの神経信号の計測、及び、組織標本による再生の確認を行った。



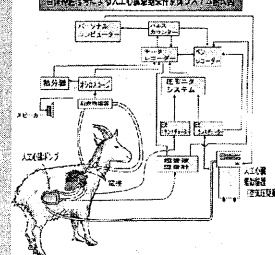
再生型電極の原理図



試作した電極

東京大学 満洲研究室 鈴木隆文博士提供

自律神経系による人工心臓駆動システムの実験例



将来的には、ES細胞による神経培養・DNAチップ・ヒトゲノムの解読結果の応用として

分子生物学的手法と電子回路技術の融合
による大規模な接続形式が発明されるかもしれない。