

システム同定理論の超音波ドプラ血流計測への応用

慶應義塾大学 理工学部 ○大甲真嗣*, 足立修一*

東芝メディカルシステムズ 馬場達朗**, 神山直久**, 河崎修一**

An application of system identification theory to the Doppler ultrasound blood-flow measurement

○Masatsugu Taiko*, Shuichi Adachi* Keio University

Tatsuro Baba**, Naohisa Kamiyama**, Shuichi Kawasaki** Toshiba Medical Systems Corp.

Abstract: Blood-flow measurement using Doppler ultrasound system is popular in ultrasonography. However, it is difficult to measure the blood-flow inside the heart automatically, because the valve signal blends into the blood signal. In this report we applied the system identification method to Doppler waveform combining with an electrocardiogram as an external input. Finally we develop a system which removes the influence of the valve automatically. Using simulations we confirmed the performance.

1. はじめに

近年、超音波ドプラ診断装置の進展に伴い、循環器や腹部の血流診断が普及している。特にドプラ血流計測は煩雑な手技を要するため、ドプラオートトレースなどの自動血流計測技術が開発されている。ところが心臓の血流計測では、血流信号以外に心腔内の弁や腱索の信号が混入するため自動計測が困難であり、現在でも手動計測をおこなっている。そこで今回は心臓の左室流出血流を対象に、自動的に弁成分を除去する自動トレース機能を開発した。

2. 技術動向と問題点

Fig.1 に頸動脈の超音波ドプラ診断画像を示す。画面上部は断層像であり、血管中央にドプラレンジゲートを設定すると、その位置での血流情報が下部画面のスペクトラムドプラ画像に表示される。スペクトラムドプラ画像の横軸は時間、縦軸はドプラ偏移周波数に対応した血流速度であり、速度分布の時間的変化を表している。また、スペクトラムの辺縁部分 (Vp: 最大流速) を自動的にトレースし心拍周期毎に特徴量を計測するオートトレース機能が実装されており、オートトレース波形が画像に重畳して表示されている。Fig.2 に左室の大動脈弁先端にドプラレンジゲートを設定した左室流出血流の診断画像を示す。この画像には、外乱として低速度で高パワーの心臓壁成分と、高速度で高パワーの大動脈弁成分が混入している。オートトレース波形に対し、前者は低速度のため影響しないが、後者は高速度のため重大な影響を及ぼす。また通常、左室流出血流には弁成分が定常的に混入するため、ユーザがスペクトラムドプラ画像をもとに手動トレースで計測しているのが現状である。

Fig.2 に、時刻-2~-1.6s(太線で示した部分)は左室流出血流計測領域中の手動トレース例を示す。スペクトラムドプラ画像中、心電図波形のR波(-2s付近)から300ms

程度が心臓の収縮期であり、大動脈弁成分の混入を意識して左室収縮期の大動脈弁出力血流を計測する必要がある。このように収縮期の血流成分のみを計測するには、弁成分を自動的に除去する新技術が必要である。

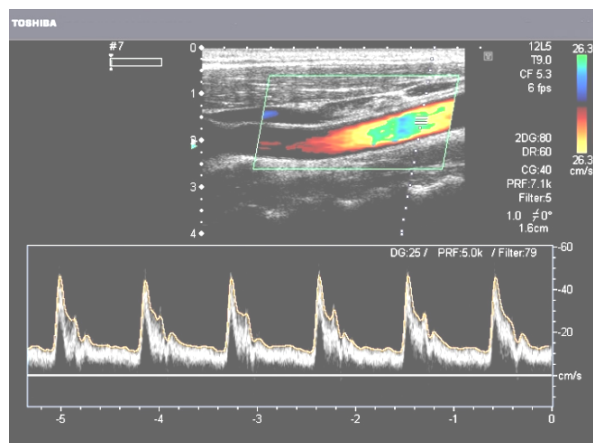


Fig.1 Doppler ultrasound Image of carotid

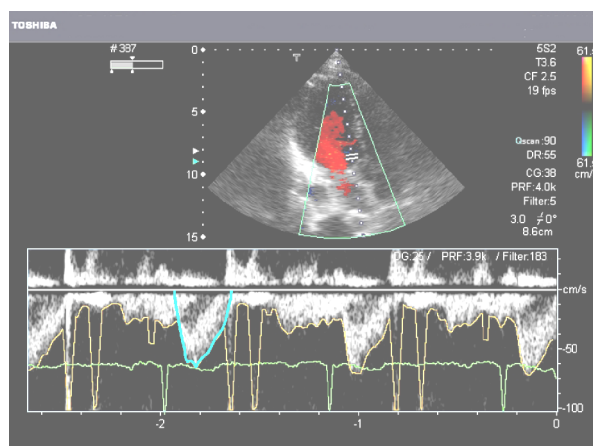


Fig.2 Doppler ultrasound Image of left ventricular outflow

3. 信号処理方式の検討

今回は心電図波形を外部確定入力とし、弁成分を外乱とし、弁成分混入のない(手動で除去した)トレース波

形を用いて Black Box モデル^{1,2)}によりシステム同定をおこなった。

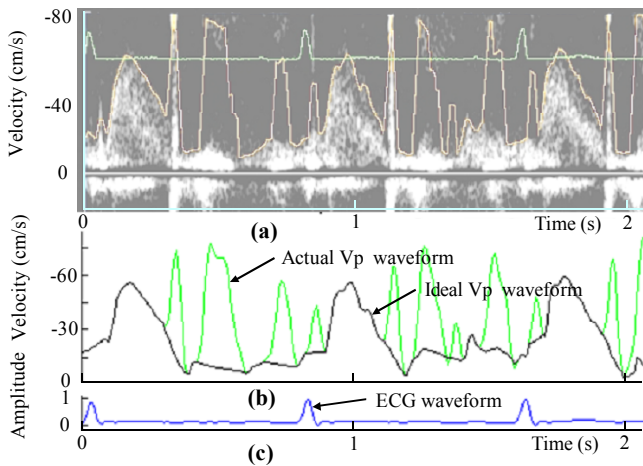


Fig.3 Outline of system identification using Black Box model
 (a) Outflow image (b) Vp and ideal Vp waveform
 (c) ECG waveform

Fig.3(a)はスペクトラムドプラ画像の一部であり、左室流出血流の画像、オートトレース波形、心電図波形が表示されている。Fig.3(b)は、実際のオートトレース波形と、スペクトラム画像から判断し弁混入を手動で除去したトレース波形である。Fig.3(c)は心電図波形である。これらの信号を伝達関数モデルに同定する。次にシステム同定結果を用いて、実際に弁混入のあるオートトレース波形と心電図波形を入力し、上記モデルでトレース予測波形を計算する。

4. システム同定モデルの選定

新方式信号処理の動作確認と性能最適化を目的とし、複数ボランティアの左室流出血流を収集し同定モデル選定と性能評価をおこなった。信号処理シミュレーションには MathWorks 社の MATLAB を使用した。3名のボランティアの波形データを心電心拍周期(R波-R波間隔)単位で切り取り、繋ぎ合わせ全体で16心拍の入力波形を作成した。システム同定をおこなう数学モデルとして、ARMAX、OE、ARX、BJモデルなどの比較評価をおこなった。

5. シミュレーションによる性能確認

性能評価のためシステム同定に用いたデータ以外のボランティアのデータを用いてシミュレーションをおこなった。Fig.4(a)は、システム同定に用いたものとは別のボランティアの診断画像である。Fig.4(b)はシミュレーション結果である。心電図のR波直後に二組の破線で囲まれた領域は、自動検出された拡張期である。第一心拍、第二心拍、第三心拍、第五心拍ではいずれ

も弁成分が除去され、収縮期の左室流出血流が正しくトレースされていることがわかる。しかし第四心拍では、弁成分は左室流出血流のピークと間違えて捉えられている。安定性の問題は若干残っているものの当初の目的である自動的に弁成分を除去する機能は実現することができた。

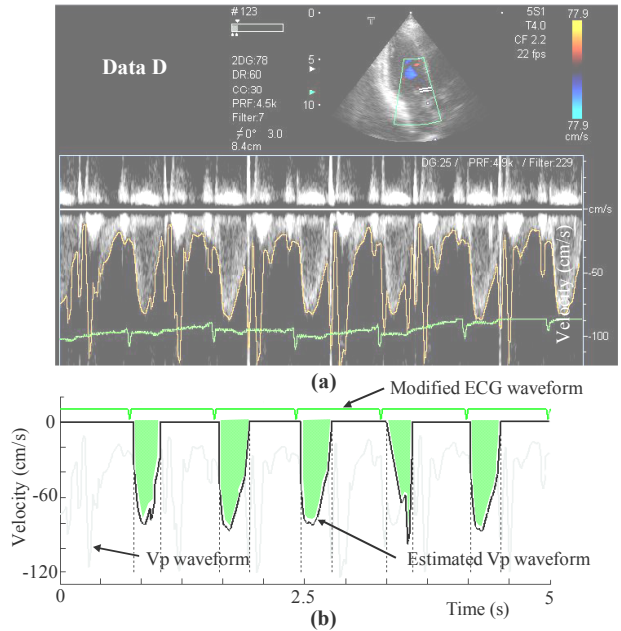


Fig.4 Simulation results of automatic valve rejection algorithm
 (a) Data of another volunteer
 (b) Estimated Vp waveform of valve rejection algorithm

6. まとめ

従来、心臓内部の血流計測は、血流以外に弁からの信号が混入するため自動化が困難であった。今回、心電図波形とドプラ波形を組合せてシステム同定をおこない、その予測波形を用いて自動的に外乱である弁成分を除去するシステムを新たに開発し、シミュレーションにより効果を確認した。

今後自動化の安定性を高めると同時に、左室流入血流や弁逆流についても自動化の検討を進めていく予定である。

参考文献

[1] 足立修一：MATLABによる制御のためのシステム同定，東京電気大学出版(1996)
 [2] 足立修一：MATLABによる制御のための上級システム同定，東京電気大学出版(2004)