

研究紹介

信頼度付き相関法を使用した超音波エコー信号からの 局所心筋運動の診断支援システムの開発

鶴岡 信治

鈴鹿医療科学大学 医用工学部 医療健康データサイエンス学科

キーワード： 信頼度付き相関法, 心筋層内の局所運動追跡, 心エコー信号, コンピュータ診断支援システム, データ駆動型アプローチ

要旨

人がある事柄について判断しなければならないが、信頼できる情報が得られない場合、その事柄に似た事柄についての情報を用いて判断する。この原稿では、筆者らが研究開発してきた「超音波エコー信号からの局所心筋運動の診断支援システム」において、前述の判断論理を定式化する方法を解説する。この研究開発プロジェクトは、医工連携により実施され、情報工学の研究者が、専門医のニーズを分析し、生体信号のデータの処理方法を提案し、分析結果を表示した。そして、臨床医が実データにより性能評価を行い、システムの性能を向上させるデータ駆動型アプローチにより追跡精度の向上を行った。その結果、独創的な計算方法（信頼度付き相関法）が開発され、この手法により、心筋層内の局所筋肉の収縮・拡張運動の可視化と、局所部位の運動性能の数値化が実現できた。

1. まえがき

超音波による心エコー診断装置は心臓の運動状況をリアルタイムで画像化し、心臓壁の運動機能を評価する上で重要なデータを提供している。そのため、現在の心臓の運動機能の診断では必要不可欠な存在である。しかし、心エコー画像は、心臓の構造が複雑で多重反射、乱反射が多く、アーチファクトなどが頻繁に出現し、専門医でも動画像から心臓の運動機能を定量的に評価することは難しい。また定量的な評価を行うには、多くの手作業を伴い、個人差が大きいいため、コンピュータによる定量化と評価システムの開発が専門医から要望されている。

筆者らの研究グループでは、1988年から三重大学の心臓病の専門医との共同研究を続けており¹⁾、心エコー画像のコンピュータによる画像解析を長期間に渡り、独自のコンピュータ診断支援システムを開発し、種々の処理方法を検討してきた。臨床医と工学研究者が共同研究を進め、学会で研究発表できる状態になると、超音波診断装置を製造している研究グループとも共同で研究開発できるようになった。また国際会議でも優秀論文賞を受賞するレベルになると、大学内だけでなく、外国の研究機関からも注目され、留学生が増えた。そして、大学内で医工連携の組織を検討するようになり、2009年には三重大学では初めての学部を持たない大学院だけの独立研究科「地域イノベーション学研究所」の設立に貢献することができ、異分野の融合研究を推進することを体験した。

本稿では、筆者らが体験した臨床医と工学研究者の共同研究の進め方、独創的なコンピュータ診断支援システムの研究開発について、広い分野の方が理解できるように解説する。

2. 超音波エコー信号による心筋運動の診断支援のための解析方法

2-1 心筋運動の診断支援システムに関する臨床医の要望（ニーズ）

筆者らの研究グループは、人工知能による画像認識に

関心があり、三重大学病院の教授から学内で医工連携の研究を実施したいとの要請があり、心臓病の共同研究を行うことになった。

心臓の臨床医は、患者の訴えに対して、聴診器、血液検査などの多種類の検査に加え、心エコー診断装置の画像から局所心筋の運動を目視により、訴えの原因（血管系の疾患か神経系の疾患か）を推定し、追加の検査、投薬の処方、手術の計画などを行う。ここで重要な役割を担う局所心筋の運動評価については、個人差があり、定量化が課題となっている。そこで、筆者らは心筋疾患の定量的な評価方法の確立を目指し、心筋の局所運動の診断支援システムの研究開発をデータ駆動型の研究開発アプローチにより行うことにした。

2-2 超音波心エコー RF 信号

心筋疾患の定量的な評価方法を確立するため、当初は心エコー診断装置に表示される B モード画像と M モード画像を対象に心筋の 2 次元平面上での運動解析を研究していた。しかし、心臓の局所心筋の周期的な運動を推定することは、複雑な乱反射によるアーチファクトと疾患部では極めて複雑な運動により、周期性のある運動軌跡について定式化できず、困難な課題であった。

超音波心エコー診断装置はパルス状の超音波を体表面に密着したプローブ（圧電素子）から発信し、体内の心臓などの臓器で反射してくる超音波信号をプローブ（圧電素子）で高周波の電気信号（RF 信号、Figure 1）に変換している。そして、RF 信号の低周波成分から B モードや M モードなどの 2 次元画像を再構成し、ディスプレイに表示している。心臓筋の微妙な運動は RF 信号の高周波成分に反映されるので、低周波成分から構成された B モード画像や M モード画像をいくら詳細に調べても、情報が欠落しており、高精度な運動解析は難しい。

そこで、筆者らは、心エコー診断装置の画像信号を解析するのではなく、RF 信号（アナログ信号）の端子を外部に出力するように改造し、独自に高速 AD 変換器によりデジタル信号に変換し、パソコンで独自の信号処理ができるようにした²⁻⁵⁾。

2-3 時系列信号の波形の類似性を数量化する相関法

相関法は、従来から人工知能システムで広く使用されており、時系列信号において類似している局所の信号波形を探すためには、登録してある局所信号と対象となる信号との全区間において、相関係数を計算し、相関係数の高い場所を探す方法である。また文字認識、物体認識では、画像中の対象物を検出する場合にこの方法を2次元に拡張した2次元相関法が広く使用されている。

①単純相関法：単純相関法は、2つの時系列信号（時刻 $t-1$ についての位置 x における信号 $f(x, t-1)$ と時刻 t の信号 $f(x, t)$ ）に関して、信号 $f(x, t)$ の中で注目点 $p(t-1)$ の移動位置を探す場合に使用される。ある信号の注目点の局所処理範囲の信号 $\{f(p(t-1)+\Delta w, t-1) | \Delta w = -W/2, \dots, W/2\}$ （時系列信号の微小範囲の集合を“テンプレート (template) またはウィンドウ (window)”という (Figure 1)) を記憶しておき、処理対象の信号 $f(x, t)$ において注目点の位置 x を変化させ、それぞれの位置における相関係数を計算する。そして、相関係数が最も大きくなる場所 $p(t)$ に注目点が移動したと判断する。この方法により、物体の移動量を求めることができ、スポーツ中継などでボール軌跡などを表示している。

②階層的相関法：超音波心エコーRF信号では、極めて複雑な反射と屈折が起こり、ある時刻 t に計測した信号 $f(x, t)$ と直前の時刻 $t-1$ に計測した信号 $f(x, t-1)$ に対して、従来から信号処理や画像処理の分野で提案されている種々の相関係数を使用してもうまく対応する位置が求まらない。

そこで、筆者らは相関法の注目点の近傍を、従来から使用されている局所処理範囲より広い範囲をテンプレート（広いテンプレート）として登録しておき、被検査対象となる信号における大まかな類似位置を検出し、その後、検出した類似位置に対して、より狭い局所処理範囲のテンプレート（狭いテンプレート）使用し、詳細な位置を求める。このように広いテンプレートと狭いテンプレートを階層的に使用し、複数の相関法を使用する「階層的相関法」を提案した²⁾。この方法を使用すれば、健常者の信号では、心筋運動がなめらかであるために、ほぼ専門医の追跡結果と同じ位置検出が可能となった。しかし、疾患部では不規則な複雑な反射と屈折が生じているため、位置の検出精度は低下した。

③信頼度付き相関法：人はある判断をしなければならないが、信頼できる情報が得られないときには、周囲の信頼できる情報により判断する。筆者らはこの論理をシステム化するに当たり、近傍の注目点の位置の信頼度は相

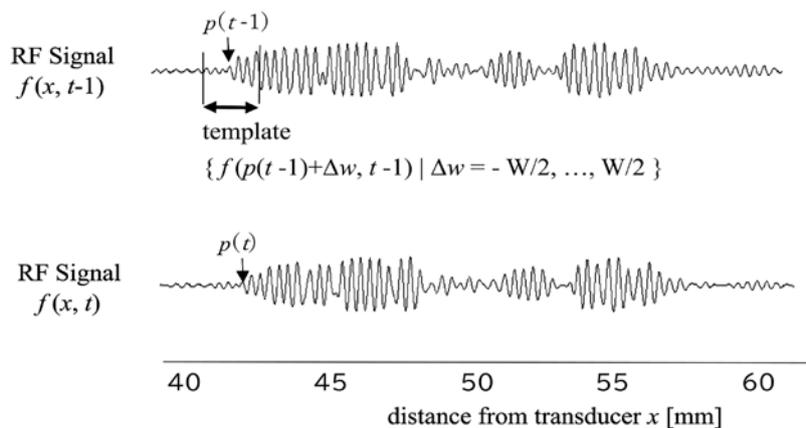


Figure 1 超音波反射波の受信信号 (RF 信号) の波形
 超音波プローブから発信したパルスエコー信号が心筋などの組織に反射してプローブで受信された信号。超音波の音響特性が変化する組織で反射が起こり、プローブからの距離が離れているほど、反射波が届く時間が遅くなる。

関係数で把握できると考え、相関係数の大きさにより重み付けした位置を検出位置とする「信頼度付き相関法」を提案した^{2,4)}。「信頼度付き相関法」は、複数の深さ ($k = 1, 2, \dots, K$) における RF 信号の注目点 p_k を設定し、それぞれの注目点の位置を求める場合に、その注目点の相関係数を使用するだけでなく、周囲の注目点における相関係数を使用する相関法である。すなわち、対象としている注目点の相関係数が高い場合は、求めた注目点の位置は信頼度が高いと考え、相関係数が低い場合は求めた位置は信頼度が低いと考え、信頼度が低い場合には、より信頼度が高い周囲の注目点の位置情報を考慮して、注目点の位置を推定する方法である。

例として、 k 番目の RF 信号における時刻 t における注目点のプローブからの位置 $q_k(t)$ を求めるには、対象としている注目点の相関係数が最も大きな位置 $p_k(t)$ に対して、直ぐ上の注目点の位置 $p_{k-1}(t)$ と下の注目点の位置 $p_{k+2}(t)$ を使用して、注目点の位置を補正する方法を以下に述べる。ただし、一番上の注目点 ($k=1$) に対しては、その直ぐ下の 2 つの注目点を、一番下の注目点 ($k=M$) に対しては、その直ぐ上の 2 つの注目点を使用して、位置を補正する。

時刻 $t-1$ における注目点 $q_k(t-1)$ のテンプレートと時刻 t の RF 信号との相関係数 $R(k, t) = r_k(q_k(t-1), p_k(t))$ 、相関係数により求めた注目点の位置 $p_k(t)$ 、その注目点の上下の位置を $p_{k-2}(t), p_{k-1}(t), p_{k+2}(t), p_{k+1}(t)$ 、同じ受信信号におけるテンプレートの範囲を Δw とすると、 k 番目の注目点の補正した位置 $q_k(t)$ は、以下の数式で求めることができる。

$$q_k(t) = R(k, t) p_k(t) + \{1 - R(k, t)\} c(k, t) \quad (1)$$

$$R(k, t) = r_k(q_k(t-1), p_k(t)) \quad (2)$$

$$c(k, t) = \begin{cases} p_{k+1}(t) - \{p_{k+2}(t) - p_{k+1}(t)\} & (k = 1) \\ \{p_{k-1}(t) + p_{k+1}(t)\}/2 & (2 \leq k \leq M - 1) \\ p_{k-1}(t) + \{p_{k-1}(t) - p_{k-2}(t)\} & (k = M) \end{cases} \quad (3)$$

これらの位置を示す Figure 2(a) では、超音波診断装置の B モード画像では、縦にプローブからの距離、横に時間を割り当てる慣例となっているので、Figure 1 と座標軸とは異なり、縦軸にプローブからの距離を、横軸にパルスを発信するスキャン時間としている。

3. 心エコー画像の運動解析結果と考察

心筋の健常部位と疾患部位について単純相関法、階層的相関法、信頼度付き相関法の 3 つの手法について、専門医の追跡結果との比較を検討した。なおこの信頼度付き相関法は、階層的相関法と信頼度付き相関法を組み合わせた方法を「信頼度付き相関法」と呼んでいる。

①被験者：健常部位は 21 歳から 23 歳の健常者 5 人の 10 部位、疾患部位は心房中隔欠損 (1 例)、アミロイドシス (2 例)、大動脈弁狭窄 (2 例)、拡張期心筋症 (1 例)、閉塞型肥大型心筋症 (1 例)、心室中隔心筋梗塞 (1 例)、右室肥大 (1 例)、肥大型心筋症 (1 例) の計 10 人、20 例である。

②相関法による追跡結果の比較：心臓の健常部位から取得した RF 信号に対して、4 つの注目点を設定し、運動追跡結果を Figure 2 に示す。縦軸はプローブからの距離、横軸は時間を示す。信頼度付き相関法の追跡結果が 1 心周期後の位置と初期位置の誤差が最も小さい、そこで、専門医と追跡結果について、心筋の厚さに関する誤差を計測した。その誤差を、単純相関法、階層的相関法、信頼度付き相関法の順に示すと、収縮末期では 2.13mm, 0.45mm, 0.14mm, 拡張末期では、2.24mm, 0.48mm, 0.16mm となり、収縮期でも拡張期でも、信頼度付き相関法が専門医の追跡結果に近いことが明確となった。

③健常部位と疾患部位における追跡結果：健常部位と疾患部位における心筋層内の運動追跡結果を Figure 3 に示す。健常部位では心筋が能動的に収縮・拡張運動をしており、また内壁に近いほど収縮と拡張が層の幅が大きく変化することが把握できる。また疾患部位では他の組織の運動に引っ張られ、動作しているが、心筋の幅の変化は少なく、受動的な運動であることが把握できる。この結果を生体医工学では国際的に評価が高いシンガポールでの国際会議で発表し、優秀論文賞を受賞することができた³⁾。またその後、この信頼度付き相関法の注目点の範囲を広げ、多数の症例についてデータ解析を行い、新しい評価指標を提案することができ、国際会議で優秀発表賞を受賞した⁵⁾。

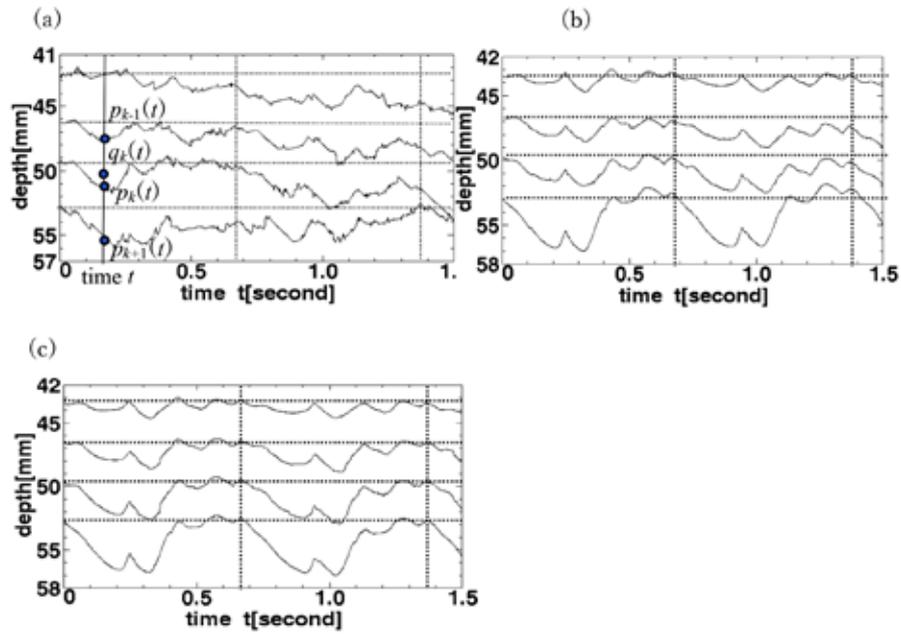


Figure 2 3つの相関法による心筋層内の局所心筋の運動追跡結果 (2心周期分)
 (a) 通常の相関法 (b) 階層的相関法 (c) 信頼度付き相関法

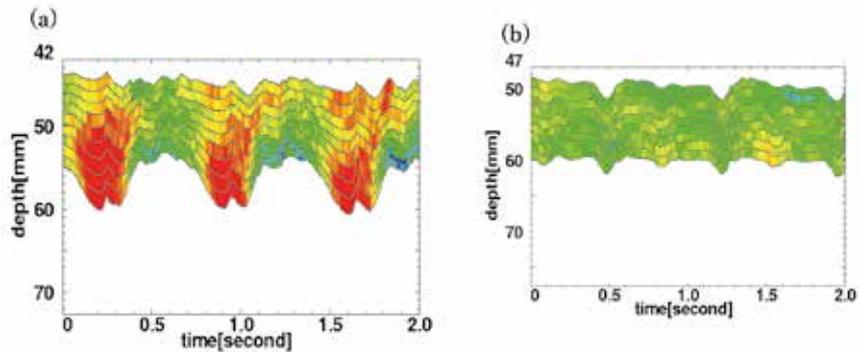


Figure 3 信頼度付き階層的相関法による心筋層内の局所心筋の運動追跡結
 (a) 健常部位：心筋の収縮・拡張運動は内膜側の心筋ほど変化が大きい。
 (b) 疾患部位（心筋梗塞部位）：心筋の収縮・拡張運動は全体的に少なく、心筋の幅は変化が少ない。

4. あとがき

臨床医学における医工連携の研究は、多くの人々が科学技術の進歩を実感し、幸福感を向上させるために、重要な研究分野である。この分野では、臨床医のニーズに関して各種信号をコンピュータのプログラムにより解析し、試作システムを作成し、臨床現場での実データで実証実験を行うプロセスが必要であり、臨床医とシステム開発者の医工連携により、システムを構築することができる。

そして、このコンピュータ診断支援システムを活用することにより、多くの患者の命が救える。是非、多くの若者にこの分野の研究開発のおもしろさとやりがいを感じていただきたい。

文 献

- 1) M. Setsuda, K. Sekioka, T. Nakano, K. Nishimiya, S. Tsuruoka, F. Kimura, Estimation of Tissue Character by

- Two-Dimensional Color Encoded Images from Local Momentary Amplitude and Frequency of Backscattered Ultrasound Using Hilbert Transform, Proc. of International Conference on Medical Informatics (MEDINF'89), 1989; 507-510
- 2) S. Tsuruoka, T. Kunisada, W. Ohyama, T. Yoshikawa, K. Sekioka, Tracking of Regional Myocardium from Ultrasonic RF Echo Signals Using Hierarchical Correlation Method with Confidence, Proc. of Asian-Pacific Conference on Medical and Biological Engineering (APCMBE'99), 1999; 424
- 3) S. Tsuruoka, T. Kunisada, W. Ohyama, T. Yoshikawa, K. Sekioka, Automatic Tracking of Regional Myocardium from Ultrasonic RF Echo Signals Using Correlation Method weighted with Confidence, Proc. of 10th International Conference on Biomedical Engineering (ICBME2000), (Outstanding Paper Award), 2000; 149-150
- 4) 関岡清次, 国定紀宏, 鶴岡信治, 石井裕丈, 大山航, 若林哲史, 超音波 RF 信号に信頼度付き階層的相関法を用いた心筋層内局所機能評価, 電子情報通信学会論文誌 D-II, 2004, 87; 98-108

- 5) Y. Mizutani, S. Tsuruoka, H. Kawanaka, T. Shinogi, W. Ohyama, K. Sekioka, New Indexes on Heart Motion Evaluation Using Ultrasonic RF Signal, Proc. of Joint 3rd International Conference on Soft-Computing and Intelligent System and 7th International Symposium on advanced Intelligent Systems (SCIS & ISIS 2006) (Best Presentation Award), 2006; 2001-2006

— プロフィール —

鶴岡 信治 鈴鹿医療科学大学医用工学部医療健康データサイエンス学科・教授 工学博士
 [経歴] 1979 年名古屋大学大学院工学研究科博士前期課程修了, 1989 年三重大学工学部助教授, 1991-1992 年ミシガン大学 (米国ミシガン州) 客員助教授, 2000 年三重大学工学部教授, 2009-2013 年三重大学大学院地域イノベーション学研究科初代研究科長, 2015-2019 年三重大学理事 (研究・社会連携担当)・副学長, 2019 年鈴鹿医療科学大学医用情報工学科・医療健康データサイエンス学科・教授。[専門] データサイエンス (文字・文書認識システムの開発, 医用画像診断支援システムの開発, 人工知能システムの開発, 地域イノベーション学など)。

The development of a computer aided diagnosis system for local myocardial motion from ultrasonic echo signals using a correlation method with confidence

Shinji TSURUOKA

Department of Health Data Science, Faculty of Medical Engineering,
Suzuka University of Medical Science

Key words: correlation method with confidence, regional motion tracking in the myocardium, echocardiographic signal, computer aided diagnosis system, data-driven approach

Abstract

When a person has to decide about a matter but has no reliable information available, he makes decisions using information about matters similar to it. In this manuscript, we explain the method of formulating the decision mentioned above logic in “a computer-aided diagnosis system for local myocardial motion from ultrasonic echo signals” that the authors have researched and developed. This project was carried out through medical-engineering collaboration, and information engineering researchers analyzed the needs of medical specialists, proposed methods of processing biosignal data, and displayed the analysis. And then, clinicians performed performance evaluations using actual data, and improved tracking accuracy with a data-driven approach that improves the performance of the system. As a result, an original calculation method (correlation method with confidence) was developed. This method makes it possible to visualize the contraction and extension movement of local muscles in the myocardium as well as to quantify the exercise performance of local regions.