

2D Tissue Trackingを利用した 心臓の動態解析法の開発

Development of Cardiac Dynamics Analysis System Using 2D Tissue Tracking

長野 智章¹⁾ Tomoaki Chono
櫻山 貴広²⁾ Takahiro Kashiyama
十亀 里³⁾ Sato Sogame

馬場 博隆¹⁾ Hiroataka Baba
宮岡 武洋²⁾ Takehiro Miyaoka
森 修³⁾ Osamu Mori

¹⁾株式会社日立メディコ 技術研究所
²⁾株式会社日立メディコ ソフト開発本部
³⁾株式会社日立メディコ US 戦略本部

2D Tissue Tracking(2DTT)法は、心エコーの動画像上で心臓の動態を計測する方法である。Mモード法や組織ドプラ法を用いた心臓動態計測に比べて、直感的にわかりやすく、自由度の高い詳細な計測が可能である。従来の2DTTは、対となる2点を動画像の全てのフレームで追跡計算させて、その2点間距離の変化を計測する方法であったが、多数の点を追跡することができれば、心筋全体の動態や容積変化の計測へ応用することが可能になる。そこで、多数の追跡点を短時間で高精度に追跡する技術を開発し、心筋全周のストレインを計測するColor Tissue Trackingと左房容積変化を計測するLA Tracking(プロトタイプ)の計測ソフトを開発した。本稿では、この追跡技術の原理を説明し、計測ソフトの機能について述べる。

‘2D tissue tracking technique’ measures cardiac dynamics based on moving images in echocardiography. This technique enables intuitive, flexible, and detailed measurements compared with conventional M-mode and tissue Doppler methods. The former 2D Tissue Tracking technique measures the distance between two tracking points using frame-to-frame tracking technique in all frames. We developed a new technique which automatically tracks many points precisely in a very short time, and also ‘Color Tissue Tracking’ software for measuring strain of whole myocardium, and ‘LA Tracking’ prototype software for measuring chamber volume. These technique and software enable us to analyze dynamical behavior of whole myocardium and whole chamber. We report the principle of this tracking technique and details of software functions.

Key Words: Tissue Tracking, Echocardiography, Motion Analysis, Heart Disease

1. はじめに

循環器疾患の診断において、心機能の指標を計測することは必須である。特に心エコー図法を利用した検査は、非侵襲で簡便に計測できることから広く用いられている。BモードやMモードを用いた検査では、拡張末期と収縮末期の静止画像を用いて、腔の容積やEF：Ejection Fraction(駆出分画)、%FS：Fractional Shortening(内径短縮率)を計測する。これらは、離散的であるがグローバルな指標として有用である。

また、心筋の局所の壁厚から%WT：Wall Thickening(壁厚増加率)が求められるが、心臓の動きに応じて計測位置を手動で同定する手間を要する。近年、臨床においては、上記のような指標に加えて、より連続的かつローカルな指標も簡便に計測し、詳細に心機能を評価したいという要望が出てきた。

この要望に応えようとした方法の一つが組織ドプラ法であったが、ビームに直交する方向の動きの検出は、ドプラ法の

限界により困難である。

そこで、われわれは、心臓の局所を連続的に角度依存なく計測する方法として2D Tissue Tracking(2DTT)法³⁾を開発し、HI VISION 900、EUB-8500/7500に搭載した。これは、Bモード動画像で局所組織の画像輝度パターンをフレームごとに連続的に追跡(Tracking)し、その軌跡を用いて計測する方法である。図1のように動画像の最初のフレームで局所を2点指定するだけで、連続して最後のフレームまで自動的に追跡計算し、2点間の距離に基づく計測を行う。例えば、%WT、ストレイン、ストレインレートの計測および計算を約30~40秒で行うことができる³⁾。さらに、多くの点を指定することができれば、心臓全体の局所動態を一挙に計算したり、心腔の輪郭を追跡して容積の時間変化を計測したりすることも可能になる。しかし、多くの点を追跡するには処理時間が長くなるという問題があり、また、簡便なユーザインターフェイスの開発も必要であった。

上記問題を解決するために、より高速で高精度な2DTTの追跡技術を開発し、心筋全体のストレインを簡便に計測するColor Tissue Trackingと左房容積の時間変化曲線を計測するLA Tracking(プロトタイプ)ソフトを開発した。本稿では、これらの技術と装置搭載したColor Tissue Trackingおよび製品化に向けて開発中であるLA Trackingの機能について述べる。

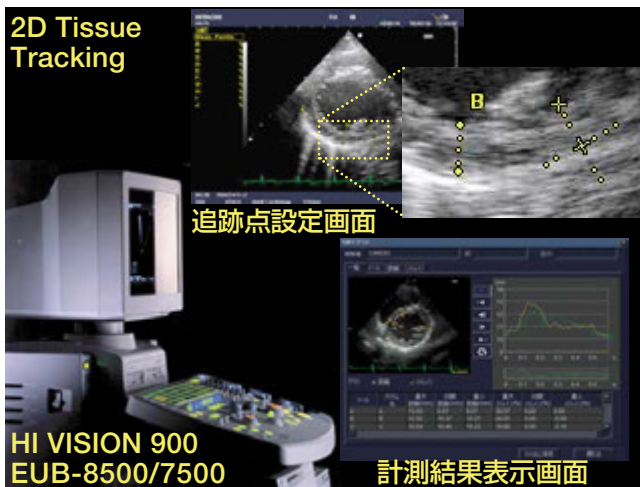


図1：2DTTシステム

超音波画像診断装置HI VISION 900、EUB-8500/7500で取得した動画像において、追跡点設定画面により計測する箇所を指定し、解析した結果は計測結果表示画面で確認できる。また、外部PCで解析するために記録ファイルを作成することもでき、回転角等の他の指標の計算に利用することもできる。

2. 2DTTの応用計測

2DTTの基本は、局所の1点を追跡してその動きを計測することである。1点だけであれば、その局所組織が動いた距離や速度が計測できる。2点に増やせば、2点間の距離や速度の関係が計測できる。さらに3点以上に増やして、面や輪郭を追跡すれば、領域の変形を計測することができる。このよう

に計測したい対象に応じて計測点を設定すれば自由度の高い詳細な計測が可能になり、心機能の指標になりうる計測を独自に行うこともできる。しかし、実際に多くの点を設定するには、簡便なユーザインターフェイスを用いる必要がある。

従来の2DTTでは、2点間の距離に基づく計測のためのユーザインターフェイスが用意されている。対となる2点の組み合わせを複数設定できるため、多くの点を一挙に追跡することも可能であるが、追跡計算にかかる時間が長く、これらの組み合わせから、面や輪郭に基づく心機能の指標を計測する簡便なユーザインターフェイスは用意されていなかった。

われわれは、今後臨床において重要になると考えられる心機能指標の計測方法として、心筋全周のストレインを計測する方法(Color Tissue Tracking)と心腔容積の時間変化を計測する方法(LA Tracking)に着目して開発を行った。まず、計測ソフトにおける追跡点の設定方法について説明する。

2.1 Color Tissue Tracking

図2左に心筋全周のストレインを計測するための追跡点設定方法を示す。短軸像上で、内膜と外膜にそれぞれ60点の追跡点を設定し追跡させる。これらの追跡点はASE16分画に基づき1分画あたり10対として6分画に分けられる。内外膜で対向する2点間のストレインを計算し、このストレイン値に応じて画像に色付けを行う。また、各分画毎にストレインの平均値を計算し、これを分画のストレイン値とする。

2.2 LA Tracking(プロトタイプ)

図2右に心腔容積の時間変化を計測するための追跡点設定方法を示す。弁輪部から対向する弁輪部まで、腔の輪郭上に輪郭の凹凸形状を表現できる間隔で追跡点を設定し追跡させる。これらの追跡点で囲まれる領域にsingle planeまたはbiplaneのModified Simpson法を適用し容積計算を行う。また、腔の軸長、輪郭長、面積も計算する。さらに、計測ソフトでは、輪郭線の数を2本まで設定可能にしている。例えば、左室と左房を同時に計測することも可能である。

これら100点を超える多くの追跡点を一挙に追跡するには、高速で高精度な追跡技術が必要である。本開発では、これらの計測を平易に行うための追跡技術も開発した。

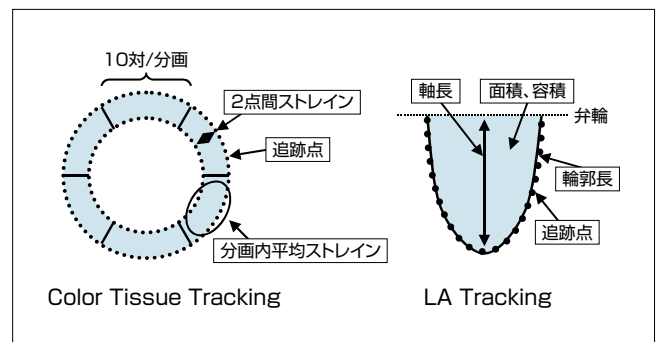


図2：追跡点の設定と指標の計算方法

Color Tissue Trackingは内外膜に追跡点を設定し、対向する2点間ストレイン値に応じて画像に色付けする。また、分画内の平均ストレイン値を計算する。LA Trackingは、心腔内膜に追跡点を設定し、軸長、輪郭長、面積、容積を計算する。

3. 2DTTの高速化と精度向上

2DTTは、図3に示すフローで計算を実行する。まず、追跡計算を精度良く行うために、ノイズを低減させてスペックルパターンの輝度の特徴を強調するフィルタを適用する。これによって、追跡誤差の原因となる画像ノイズの影響を抑えた高精度な追跡を実現する。特に、ノイズに埋もれた組織や探触子から遠く描画条件が悪い位置に存在する左房において追跡精度が向上する。

次に、ADG(Adaptive Density Gradient)法を利用した追跡計算を行う。追跡計算はパターンマッチング法を用いており、図4のように、ある時間 t のフレームの追跡点座標 (x, y) 周辺1cm角にROIを設定し、この輝度を $I(x, y, t)$ とする。また、次のフレーム $t + \Delta t$ で (u, v) だけ移動したときの輝度を $I(x + u, y + v, t + \Delta t)$ とする。 $I(x, y, t)$ と $I(x + u, y + v, t + \Delta t)$ の相関計算を行い、最も相関値の高い (u, v) を探索して求める。

ADG法は、2DTTの高速化と精度向上を実現する手法である。図5に示すように、セクタ像を構成するビーム上の画素の輝度パターンのみを用いて追跡計算を行うので計算量が減り、高速な追跡が実現できる。また、従来の心筋追跡方法は左室用に最適化されていたが、ADG法は、左房のように左室と異なる壁運動や形態、音響的な特徴を有する組織にお

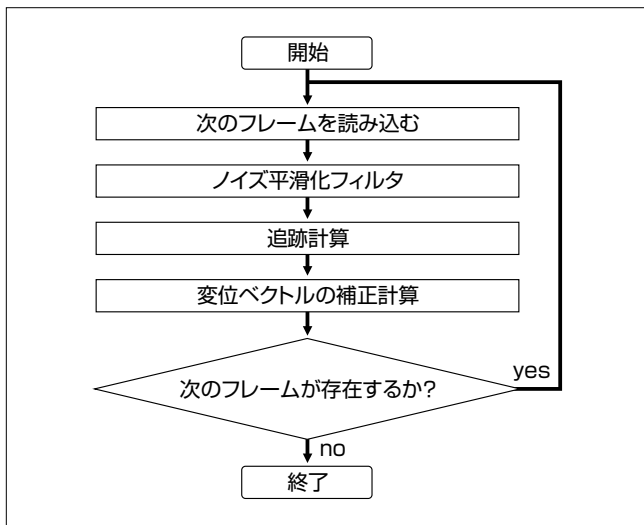


図3：2DTTの計算フロー

動画の全てのフレームについて、ノイズ平滑化フィルタ、追跡計算、変位ベクトルの補正計算を繰り返し行う。

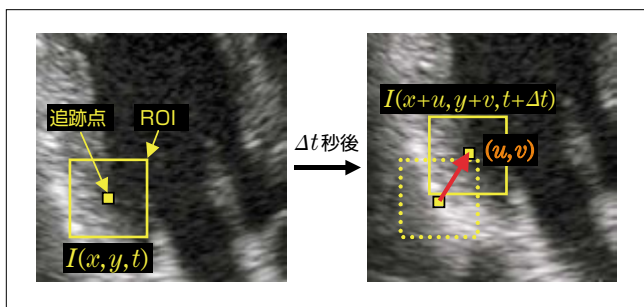


図4：パターンマッチング法

時刻 t の追跡点周辺の輝度 I が Δt 秒の間に移動する変位ベクトル (u, v) を計算する。

る追跡精度を向上させる。

左房の低速な壁運動に対しては、ビームの方位方向密度に応じて最適化した追跡領域を選択することによって左房壁の微小変位を捕らえる。左房壁は一部が欠損して描画される場合が多く、一般的にROIサイズを大きくして追跡計算を行うため計算時間が長くなるが、本手法ではビーム上の輝度パターンのみを用いることによって短時間の追跡を可能にしている。方位分解能が悪い場合には、ビーム上の輝度パターンのみを用いることによって見かけの方位分解能を高め、追跡点が方位方向へ滑るような動きを防止して追跡精度を向上させている。

追跡計算が終了すると、変位ベクトル (u, v) の補正計算を行う。心臓は1心周期で元の位置に戻る周期性を持っている。これを利用して、変位ベクトルの誤差を推定し補正している。また、空間的に隣り合う追跡点が似た変位ベクトルを持つ性質を利用した補正も行って、より高精度で安定した追跡を可能にしている。

処理時間は、標準的な80fpsの1心拍動画の場合でおよそ10秒である。追跡精度の向上技術を適用しているものの、やはり、追跡精度は画質に依存しやすいため、スペックルパターンや膜面が1心拍にわたって発生、消滅せずに明瞭に描画されるよう注意する必要がある。

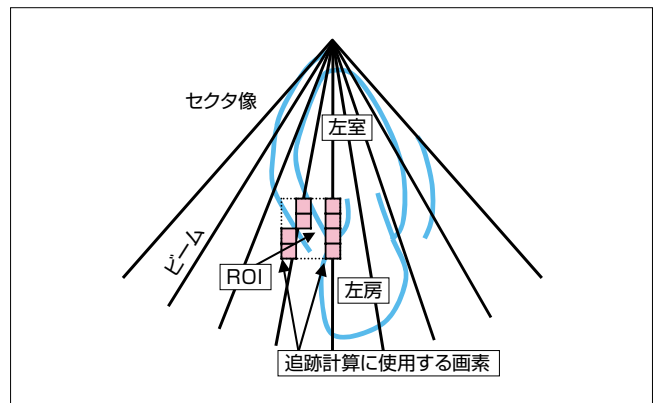


図5：Adaptive Density Gradient法

ビーム上に存在する画素の情報のみを用いて追跡するため、計算量を大幅に減らすことができる。

4. 計測ソフトの機能

4.1 Color Tissue Tracking

図6はColor Tissue Trackingの計測設定画面である。動画ファイルを開いて、設定を開始すると、図6左のように最初に内膜を指定するための円が表示される。この円を内膜に沿うように大きさを調整しながら配置する。次に、図6右のように設定した内膜の外側に外膜を設定する円が現れる。内外膜間の距離を設定することで、外膜を同心円状に拡大縮小できる。また、輪郭をドラッグすることで局所的に輪郭を変形させることもできる。このようにして内外膜を設定して計測を開始すると、自動で内外膜の動きを追跡し計測結果を表示する。

図7はColor Tissue Trackingの計測結果画面で、短軸像の収縮末期におけるストレイン値を色付けて表示している。紫色の部分にはストレイン値が低く、黄色の部分にはストレイン値が高いことを示しており、この例では、壁が十分運動していない部分が存在することがカラー画像から直感的に理解できるように示されている。

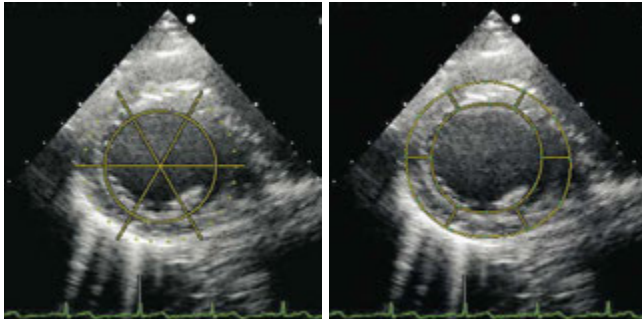


図6：Color Tissue Trackingの追跡点設定画面
円形の描画ツールで内膜位置を設定(左図)した後、外膜位置を設定(右図)し、6分画に分割する。

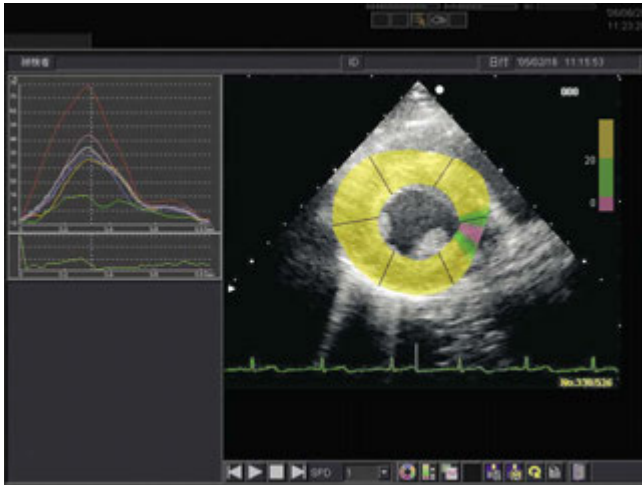


図7：Color Tissue Trackingの計測結果画面
ストレイン値が高い部分を黄色、低い部分を紫色で示し、動画再生する(色の種類はユーザによって変更可能)。

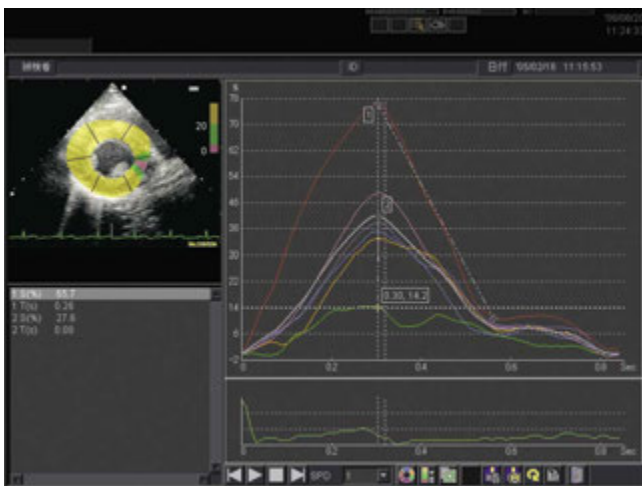


図8：Color Tissue Trackingの計測結果グラフ
分画ごとにストレインの時間変化をグラフ化する。グラフ上をクリックすると値の測定も可能である。

図8はColor Tissue Trackingの計測結果グラフで、各分画のストレイン変化を表示しており、ASE16分画に基づく心臓動態の定量化を行うことも可能である。

計測値は、表計算ソフトで編集可能な形式に出力可能で、図7の動画像を保存することもできる。

4.2 LA Tracking(プロトタイプ)

図9はLA Trackingの計測設定画面である。弁輪部から対向する弁輪部まで左房の内膜を手動でトレースすると、適度な間隔で追跡点が自動設定される。同時にModified Simpson法による容積計測を行い、ディスク(緑色)と長軸(赤色)の線を表示する。このようにして内膜を設定して計測を開始すると、自動で内膜を追跡し計測結果を表示する。計測の種類は、この追跡点で囲まれた領域における容積とその変化速度、弁輪の中心から腔の尖部までの軸長、輪郭の長さ、腔の面積である。

図10は図9のLA Trackingの計測結果画面である。一目で左房容積変化を把握できるようになっている。この結果は、



図9：LA Trackingの追跡点設定画面
心房の内膜をトレースすると、輪郭上に追跡点を自動設定する。

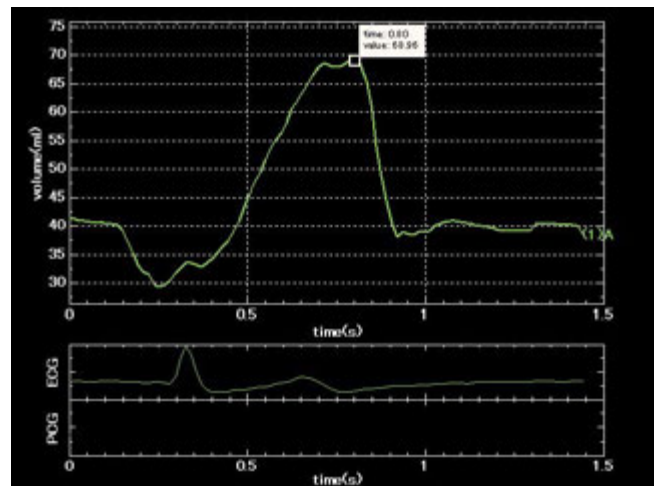


図10：LA Trackingの容積計測結果グラフ
左房容積の時間変化のグラフを表示する。グラフ上をクリックすると値の測定も可能である。

心臓に負荷をかけたときの容積計測を行った例である。計測値は、表計算ソフトで編集可能な形式に出力可能で、図9の動画像を保存することもできる。

5. 2DTTの将来

2DTTは、Bモード画像の輝度パターンに基づく計算を行っている。従って、1心周期にわたって輝度パターンが発生、消滅しないよう描画することが精度向上のために重要であり、基本画質の向上が課題となる。

心臓は3次元的に動き、拍動や呼吸による動きの影響もある。よって、2Dで解析している限り断面に直交する動きを捉えることができない。これを解決するには、3D画像での追跡を行うことが必要になる。3D画像は情報量が多いため、より一層高速な追跡技術を開発していく必要がある。

また、追跡点を手動で設定するために、一度動画像を取得してから解析を行う必要がある。手動設定の手間を省き、リアルタイム性を高めることにより、より簡便に計測することが可能になると考えられる。

6. まとめ

2D Tissue Trackingの応用計測であるColor Tissue TrackingとLA Tracking(プロトタイプ)ソフトを開発した。これらの計測を実現するためのユーザインターフェイスと、多数の追跡点を短時間に高精度で追跡する技術を開発し、Color Tissue TrackingをHI VISION 900、EUB-8500/7500に搭載した。

7. 謝辞

Color Tissue Trackingの開発は、川崎医科大学循環器内科教授 吉田清先生、同講師 渡邊望先生、同 岡橋典子先生との共同研究に基づいたものである。また、LA Trackingの開発は、藤田保健衛生大学坂文種報徳會病院循環器内科助教授 田畑智継先生、徳島大学病院循環器内科助手 山田博胤先生との共同研究に基づいたものである。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 馬場博隆, ほか: 2D Tissue Tracking技術の開発. MEDIX, 43: 19-22, 2005.
- 2) Tomohiko T, et al : Assessment of regional myocardial strain by a novel automated tracking system from digital image files. J AM Soc Echocardiogr 17 : 1234-1238, 2004.