C114

二次元心エコーに基づく心臓の三次元モデリングとストレイン解析

Strain analysis by 3D heart model based on 2D echo data.

学 ○林慎一（東工大） 井上雅貴（東工大） 正 木村仁（東工大） 正 伊能教夫（東工大）
 納富雄一（葉山ハートセンター） 中島康博（（株）ワイディ） 富田紀男（（株）ワイディ）

Shinichi HAYASHI, Tokyo institute of Technology, hayashi.s.ai@m.titech.ac.jp

Masaki INOUE, Tokyo institute of Technology

Norio INOU, Tokyo institute of Technology

Hitoshi KIMURA, Tokyo institute of Technology

Yuichi NOTOMI, Hayama Heart Center

Yasuhiro NAKAJIMA, YD,LTD

Norio TOMITA, YD,LTD

Key words : Echocardiography, 3D-Modeling, Strain analysis, Left ventricular motion

1. 諸言

心臓疾患の診断、治療を行うためには心臓の動態を的確に把握することが必要不可欠である。特に左心室は全身に血液を送り出す重要な役割を担っており、詳細な三次元動態把握が求められる。心臓の動態を三次元的に測定するシステムはCT、MRI、3次元超音波装置などがあるが、フレームレートが2~30fpsと低く、高精度に観察することができない。一方、二次元超音波装置(2D エコー)は十分なフレームレート(50~80fps)があり、比較的鮮明な画像を取得可能であるが、一度の撮影で心臓の一断面しか観察することができない。

そこで本研究では高フレームレートを有し、鮮明な画像を取得可能な複数の2Dエコー画像を組み合わせ、3D動態モデルを構築することを目的とする。利用する断面は世界標準である複数の短軸、長軸断面画像に基づいたものである。得られた三次元動態モデルを利用することで、二次元像からは得られない体積、各種ひずみ、ねじれなどの動態情報を取得して、全体の動きを把握するだけでなく、診断に役立てることも視野に入れる。

本稿では3Dモデルの構築法および各症例についてストレイン解析を行った結果について述べる。

2. 三次元動態モデルの構築

2.1 エコー像から特徴点を追跡

Fig.3に示す長軸(3断面)、短軸(5断面)の撮影を行う。GE社製2Dエコー装置によりスペクトルトラッキングの手法を用い、特徴点座標を各断面で取得する[1]。

Fig.1 Scanning planes of the human heart by 2D echo.

2.2 各断面の心周期の同期

2Dエコーでは同時に複数の断面を撮影することができず、2.1にて撮影した各断面の心拍は同一心拍ではない。また、

患者が安静状態であっても常に心周期は若干変動している。そのため、各断面の心周期を同期させる必要がある。心拍はFig.2に示すように収縮期(Systolic phase)と拡張期(Diastole phase)から成り、拡張期が変動しやすい。拡張期の内では緩速充満期(Slow filling phase)が特に変化するが、心拍数が高くなるほどこの期間が短くなる。そこで8断面の内、最も1心拍時間が長い断面を基準とし、残り7断面で、心拍数80以下ではFig.2の緩速充満期を、疾患心臓に多く見られる心拍数80以上では急速充満期(Rapid filling phase)から心房収縮期(Atrial systole phase)までを調整して心周期の時間を揃える。具体的には、これらの期間をスプライン補間によりフレーム間の座標を内挿し、全断面データを同期する。

Fig.2 Classification of cardiac cycle.

2.3 三次元動態モデルの初期形状の決定

各断面の撮影データは、正確な相対位置、角度が不明なためフィッティング操作が必要である。長軸断面は4CH、2CH、APLAXの順に30~60°、60~90°の相対角度で撮影されるが、確定した角度ではない。そこで、短軸と長軸断面を特定の範囲内で組み合わせながら移動させ、差異の二乗和が最小になる断面の配置を決定する。現状では各短軸断面は平行に撮影されていると仮定している。

Fig.3 Combination of long and short axis data

2.4 三次元モデルの動きの推定

前節に述べた方法で構築したモデルの初期形状を円柱座標系に変換する。時刻 t における任意格子点座標を θ は短軸データから、 z は長軸データから、 r は短軸と長軸データを平均化して取得し、 (r, θ, t) を算出する。Fig.4は、それぞれ正常心(normal heart)、心筋梗塞(Infarcted heart)、同期不全(Dyssynchrony heart)のエコーデータから構築した3Dモデルの

拡張末期の様子である。構築したモデルを利用して、円周方向のひずみ、長軸方向のひずみ、面積ひずみ、体積、ねじれ、CURE(左心室壁における円周方向のひずみの同時性を考慮し、同期不全の度合いを数値化したもの)などを算出し、視覚化することが可能である。

Fig.4 3D left ventricular heart model

(a)Normal heart, (b)Infarcted heart, (c)Dyssynchrony heart

3. ストレイン解析による心臓動態の評価

構築したモデル表面上に切られている 45,360 個の三角格子の面積 $Area(i, j, t)$ を求め、式(1)のようにひずみ速度を算出し、ひずみ速度が正の格子、負の格子同士で総和を取り、それを表面積で正規化する。

$$\gamma = \frac{\sum_{i,j} \frac{Area(i, j, t) - Area(i, j, t-1)}{Area(i, j, 0)}}{\sum_{i,j} Area(i, j, t)} [1/mm^2] \quad (1)$$

(a)Normal heart

(b)Aortostenosis

(c)Dyssynchrony heart

(d)Infarcted heart

Fig.5 Amount of area strain rate divided by surface area

Fig.5 に正常心(Normal heart)、大動脈狭窄症(Aortostenosis)、同期不全(Dyssynchrony heart)、心筋梗塞(Infarcted heart)の結果を示す。グラフ中の 0 以下は収縮を、0 以上は拡張を表している。(a)のグラフでは、最初の谷(0 以下)が収縮期、次の山(0 以上)が急速充満期、次の動きの少ない部分が緩速充満期、二番目の山が心房収縮期を表している。Fig.5 の(c)の同期不全では収縮と拡張が同時に起こり、(d)の心筋梗塞では全体の面積ひずみ速度の総和、つまり全体の収縮量が正常心臓に比べ 50%程度である。血液を送り出す機能が低下していることが示唆される。これらをポンプ機能の評価指標として利用できないかを今後検討する。

4. 心臓の動態に関する再現性検証

3D 動態モデルを組み上げる際に使用する各断面データは、同一心拍時のデータではない。正常、異常に関わらず、心臓の動態は、ほぼ同じであると仮定しモデルの構築を行っている。そこで、正常心臓と同期不全のエコーデータに関して心拍の再現性を検証するために連続した心拍での動態の差異を比較した。また、同一データに対し、再度スペックルトラッキングを行い、特徴点座標の要となるスペックルトラッキングの再現性についても検証した。8 断面それぞれの平均面積を算出し、比較したのが以下の Table.1 である。A1 は 1 心拍目、A2 は 2 心拍目の平均面積、A2r は 2 心拍目のデータを再度トラッキングした際の平均面積である。

同心臓による動態の差異は 0.9~8.9%、スペックルトラッキングによる差異は 1~8%であった。これらの結果より、本モデルは平均 5%程度の誤差に収まっている。

Table 1 Difference of normalized average area at the same heart

(a)Normal heart

Cross section	4ch	2ch	APLAX	MV	PM1	PM2	PM3	AP
A1[mm ²]	3681	3915	4160	3111	3343	3593	2665	1128
A2[mm ²]	3510	3792	4118	2924	3139	3636	2836	1056
A2/A1 [%]	95.3	96.9	99	93.9	94	101.2	106.5	93.9

(b)Dyssynchrony heart

Cross section	4ch	2ch	APLAX	MV	PM1	PM2	PM3	AP
A1[mm ²]	3386	3400	3244	1800	1874	1884	1107	831
A2[mm ²]	3272	3466	3220	1812	1965	1762	1044	897
A2r[mm ²]	3259	3758	3269	1850	1988	1880	1001	839
A2/A1 [%]	96.5	102.1	99.3	100.9	104.9	93.4	94.2	108.9
A2r/A1 [%]	99	108	102	102	101	107	95.9	93.5

5. 結論

2D エコーからの三次元左心室動態モデルを構築する手法に関して示した。各症例の構築したモデルから各種ひずみを算出し、各症例間で有意な差があることを示した。

参考文献

- [1] Matthew S. Suffoletto, *et al.* Novel Speckle-Tracking Radial Strain From Routine Black-and-White Echocardiographic Images to Quantify Dyssynchrony and Predict Response to Cardiac Resynchronization Therapy. *Circulation*, vol.113(2006), pp.960-968
- [2] DEPASQUALE E. *et al.* Quantitative rotational thallium-201 tomography for identifying and localizing coronary artery disease. *Circulation*, vol.77(1988), pp.316-327.