

修士学位論文要約 (平成19年 3月)

血管壁軸方向変位の超音波計測による外膜位置同定に関する研究

沼田高典, 長谷川英之, 金井 浩

Study on Detection of Outer Boundary of Arterial Wall Using Its Longitudinal Displacement Measured with Ultrasound

Takanori NUMATA, Hideyuki HASEGAWA and Hiroshi KANAI

The longitudinal motion of the arterial wall can be observed in a B-mode image obtained by conventional ultrasonic diagnosis equipment. In this study, the longitudinal displacement was quantitatively estimated by block matching of RF echoes using cross correlation. However, the estimated longitudinal displacement is discrete depending on the spacing between two ultrasound beams of about 0.1 mm. Such an accuracy is not sufficient for tracking of the region of interest (ROI) in the arterial wall. Therefore, the spacing of 0.1 mm is reduced using the interpolation of measured RF echoes to improve the tracking of the ROI in the displacement estimation. In this study, the optimum parameter in the interpolation was investigated. The spatial distribution of longitudinal displacements along the arterial radial direction was estimated using the optimum parameter. There were significant differences between the longitudinal displacements in the arterial wall and those in the region considered to be tissue outside the artery wall. These results show the possibility of this method for identifying the outer boundary of the adventitia, that has not been achieved by the conventional ultrasonic imaging.

1. はじめに

近年、超音波診断装置の発達によって血管の径方向の動きだけでなく、長軸方向の動きが観測できるようになった。長軸方向の変位が定量的に計測できれば、異なる長軸方向位置での変位の差を計測することで血管長軸方向の伸縮が評価でき、また、内膜、中膜、外膜の長軸方向変位を計測することで血液のずり応力によるずりひずみの推定ができる可能性がある [1]。さらに、従来の B モード断層像では外膜位置が検出できないが、長軸方向の動きは血管壁と血管外組織とは変位量が異なることを用いて、深さごとの長軸方向変位分布から血管壁の外膜位置が同定できる可能性がある。このように、血管の長軸方向の動きを計測することで血管壁の動きを生理学的に考察し、血管の診断に応用できる可能性がある。

本研究では、関心領域 (ROI) を高精度にトラッキングできるように受信 RF 信号を補間することによりビーム間隔を減らし、相関関数により長軸方向変位を推定する。このとき相関係数のばらつき、変位の推定誤差を評価し、最適な補間本数を決定する。さらに、決定したパラメータを用いて長軸方向変位を推定し、血管の長軸方向の伸縮、血管壁の深さごとの長軸方向変位値の分布を示し、生理学的考察を行った。また、長軸方向変位分布から血管壁の外膜位置の同定を目指す [3]。

2. 長軸方向変位の推定方法

10 MHz の超音波プローブを用いて、超音波ビー

ムを血管長軸方向に 0.1 mm 間隔で走査し、各ビーム位置において受信 RF 信号を計測する。

次に、隣り合う走査線間を補間する。受信 RF 信号を直交検波し、複素信号にした後、2本の走査線間で振幅と位相をそれぞれ線形補間することにより補間信号を作る。

血管長軸方向の変位は、第 n フレーム内に関心領域を設定し、第 n と $n + \Delta N$ フレームにおける補間信号を加えたデータセットについて相関を計算することにより推定する。相関係数を最大とする深さ、血管軸方向シフト量 Δm 、 Δl を第 n フレームと第 $n + \Delta N$ フレーム間における対象物の深さ方向と血管軸方向の移動量 $\widehat{\Delta m}$ 、 $\widehat{\Delta l}$ として決定する。

以上のようにして決定した移動量 $\widehat{\Delta l}$ 、 $\widehat{\Delta m}$ から、第 n フレームと第 $n + \Delta N$ フレーム間における深さ方向と血管軸方向の平均速度を算出し、これに ΔT を掛けることにより第 n フレームと第 $n + 1$ フレーム間の変位を算出する。このフレーム間変位により第 $n + 1$ フレームにおける関心領域の位置を更新し、同様の処理を繰り返す。

3. 基礎実験による補間本数の決定

血管を模擬したシリコンチューブを用いて水槽実験を行った。自動ステージを用いて、プローブをシリコンチューブの長軸方向に一定速度で動かし、相対的に長軸方向変位を発生させた。

図 1 は、補間本数 $K = 0$ 、フレーム間隔 $\Delta N \cdot \Delta T = 63 \text{ ms}$ ($\Delta N = 12$)、自動ステージを 1 mm/s

で長軸方向に動かしたときの速度推定結果である。図1より、真値(ステージ速度)に対して推定値に誤差が見られ、誤差の評価より補間本数について考察した。相関係数のピーク位置は本来は真のシフト量位置となるが、相関係数は離散的に算出されるため、その算出間隔内に真のシフト量が位置するとき、理論的には、真値に最も近いシフト量が推定結果として決定される。この理論上の速度推定値と真値との差がバイアスエラーの理論値となり、バイアスエラーの理論的な最大値は相関係数算出間隔(ビーム間隔)の半分となる。また、ランダムエラーを推定値の標準偏差で評価する。ランダムエラーの原因は信号に含まれるノイズであると考え、ステージを静止した状態で水槽実験を行った。図2は、補間本数を増加させたときの理論上のバイアスエラーとランダムエラーである。ランダムエラーよりバイアスエラーが小さくなったとき、それ以上補間する必要がないと考え、バイアスエラーの理論値がランダムエラーの飽和値 $5 \mu\text{m}$ 程度となる補間本数8が補間の限界となると考えた。

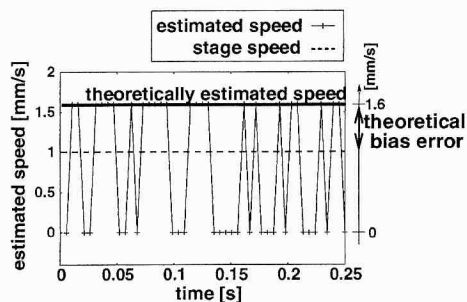


図1: 補間本数 $K = 0$, フレーム間隔 $\Delta N \cdot \Delta T = 63 \text{ ms}$ における速度推定結果。

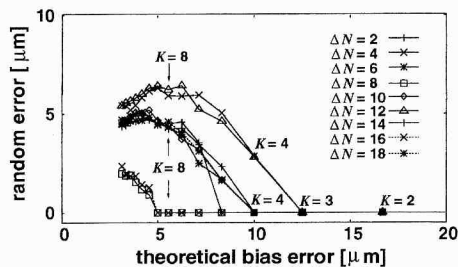


図2: 各フレーム間隔におけるバイアスエラーの理論値と変位のランダムエラー。

4. 頸動脈壁の長軸方向変位推定結果

図3は、頸動脈壁中の異なる深さにおける、時刻ごとの頸動脈壁の長軸方向推定変位である。図3より、頸動脈壁が心臓方向に動いていることが分かる。

これは、心臓の収縮によって頸動脈が心臓方向に引かれるためであると考えられる。0.1 ms から 0.2 ms 付近の長軸方向変位の減少は血流によるずり応力の影響と考える。また、深さ A, B, C において、変位波形は類似しているが、その振幅が異なる。

図4は、深さ 0 mm (内膜表面) から 1.3 mm までの図3の時刻 $t = 0.13 \text{ s}$ における深さごとの長軸方向変位の値である。図4より、深さ 0.5 mm 付近で急激な変位の減少が見られる。これは頸動脈壁と外膜外組織の長軸方向変位が異なるためであると考えられる。

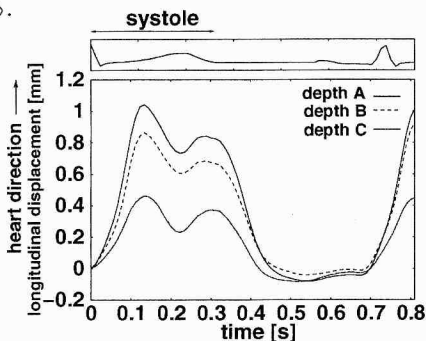


図3: 時刻ごとの頸動脈壁の長軸方向変位。

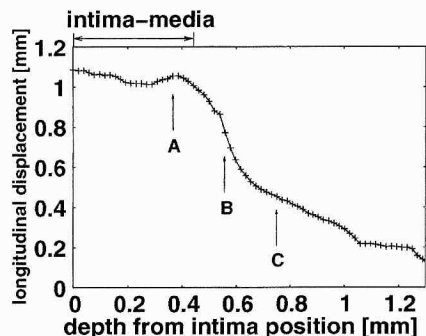


図4: 頸動脈壁の長軸方向変位の深さ方向分布。

5. 結論

本論文では、血管長軸方向変位を計測することにより、血管壁と血管外組織との境界が検出できる可能性を示した。また、血管の長軸方向変位を推定することによって、血管の長軸方向の伸縮など、血管の状態を評価できる可能性がある。

文献

[1] M. Cinthio, et al., *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, Vol. **291**, pp. 394-402, 2006.
 [2] M. Cinthio, et al., *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.*, Vol. **52**, pp. 1300-1310, 2005.
 [3] T. Numata, H. Hasegawa and H. Kanai, *Jpn. J. Appl. Phys.* (in press).