D 2 0 9

低コヒーレンス干渉計を用いた生体組織歪み分布計測法の定量評価

佐伯 壮一[○](山口大), 坂田 義太郎(山口大), 橋本 洋平(山口大)

斉藤 俊(山口大), 廣 高史(山口大), 松崎 益徳(山口大)

Study on Quantitative Evaluation of Optical Coherence Straingraphy using low coherence interferometer

Souichi SAEKI, Yoshitaro SAKATA, Youhei HASHIMOTO,
Takashi SAITO, Takafumi HIRO and Masunori MATSUZAKI

ABSTRACT

Acute coronary syndromes are caused by the rupture of unstable plaques on coronary arteries. The stability of plaque, which depends on bio-mechanical properties of fibrous cap, should be diagnosed crucially. Recently, Optical Coherence Straingraphy (OCS), e.g. an estimator of micro bio-strain distribution, has been being improved on the basis of Optical Coherence Tomography. This is composed of the recursive cross-correlation technique, Adjacent Cross-correlation Multiplication (ACM) as a speckle noise reduction method and displacement vector correction which can take account of tissue incompressibility. Thus this can provide an accurate strain map with high resolution. In this study, this was applied to simulated OCT images of compressed tissue samples to carry out the accuracy verifications. Consequently, it was quantitatively confirmed that the proposed method can obtain the accurate strain map with high resolution.

Keywords: Optical Coherence Straingraphy, Adjacent Cross-correlation Multiplication, Recursive cross-correlation, Speckle Noise Reduction, Bio-mechanics, Tissue diagnosis

1. 結 論

日本人の3大死因に上げられる、狭心症や心筋梗塞などの急性冠症候群は、冠状動脈内の不安定プラークが破裂することにより発生する¹⁾。プラークは脂質成分が血管壁に沈着し、それを覆う線維性被膜によって形成されている。特に、不安定プラークは脆弱な線維性被膜によって覆われているため、容易な破裂により血管内腔が狭窄し急性冠症候群に至る。このため、線維性被膜の脆弱性を診断する計測法が求められている¹⁾。

現在、プラーク診断システムとして、光コヒーレンストモグラフィ(Optical Coherence Tomography; OCT)²⁾の開発が進められている。これは、近赤外広帯域光の低コヒーレンス干渉を利用した断層画像法であり、1~10 μm の高空間分解能で断層画像を得ることができる。著者らは、プラークの組織力学特性の診断法としてOCS法(Optical Coherence Straingraphy)³⁾を提案している。これは変形前後のOCT画像に再帰的相互相関法を適用し、生体組織におけるマイクロスケール力学場の断層像を得る手法である。しかし、これまで提案手法の定量評価が不十分であった。本研究では、OCS法の妥当性を定量評価するため、シミュレーションにより作成したOCT画像に本手法を適用し推定力学場の定量評価を行う。

Fig. 1 OCS algorithm³⁾

2. Optical Coherence Straingraphy

OCS アルゴリズム³⁾のフローチャートを図1に示す。本手法は、組織変形前後のOCT画像に相互相関法を適用し、算出された移動ベクトル分布から歪み分布を得る手法である。階層(Stage)的に検査領域を縮小し、空間解像度を高める再帰的相互相関法⁴⁾を採用するため、前解像度(Stage)において推定された移動ベクトルを参照し探査領域の限定を行い過誤ベクトルを抑制する。更に、スペckルノイズの影響を低減するため、隣接相互相関乗法(ACM)⁴⁾を導入している。スペckルノイズの影響を受けた相関値分布には、ランダム性を有する不確かな相関値が多発しており、正確な最大相関値座標を決定する

Fig. 2 FEM model and Simulated OCT image

ことができない．そこで，隣接検査領域に対する相関値分布の乗算により，そのランダム性を低減させ，最大相関値の決定に対する S/N を高く保ち，正確な移動座標の抽出を行う．更に，速度修正ポテンシャルを用いた，移動ベクトル修正アルゴリズムも導入している．なお，算出した移動ベクトル分布に対して 3 次スプライン補間を適用し歪み分布の算出を行った．

3. 検証方法

提案手法の有効性を定量的に検討するため，モンテカルロ・シミュレーションによって作成した OCT 画像を本手法に適用し，推定変位量と推定歪み量の定量評価を行った．この画像は，多数の散乱体からなる後方散乱強度分布と点広がり関数 $h(x,z)$ の畳み込み積分値に，散乱減衰を考慮して表現した． $h(x,z)$ は光源の自己相関関数と対物レンズの瞳関数の積で表される．散乱体の座標はスペックルパターンを模擬するため一様乱数により決定し，散乱体の強度値はその大きさや屈折率変化にも関係するため正規乱数によって決定した．更に OCT 画像にランダムノイズを混入させた．散乱体の移動量 (u,v) は有限要素解析結果の変位量に基づき，散乱体を内包する有限要素節点の移動量を用いて算出した．図 2 右に示すように，解析モデルはプラーク中の石灰化を模擬し，内部に弾性率の異なる円柱物体を設けた．上方から下方へ 25 μm の圧縮量を与え，移動ベクトル分布と各方向に対する歪み量分布を算出し，提案手法の妥当性について考察を行った．

4. 結果および考察

図 2 左に，作成した変形前後のシミュレーション OCT 画像の一例を示す．散乱係数の影響により，画像の奥行き方向に従い OCT 信号強度が減衰していることが確認できる．図 3 に 4th stage (解像度 $\Delta x = 24 \mu\text{m}$) において推定された歪み分布を示す．有限要素解析結果と類似した歪み分布の算出が可能であり，弾性率の異なる組織境界を抽出していることが分かる．図 4 左に，OCT 分解能に対するサブピクセル精度として，その誤差範囲内に収まる検出移動ベクトル数の割合を表示する．本手法では，OCT 分解能以下の誤差で移動ベクトルを推定可能であ

Fig. 3 Strain Map of FEM and OCS results

Fig. 4 Displacement error and Strain error

ることが確認できる．また図 4 右に，4th stage において算出された歪みテンソル値の誤差評価として，誤差範囲内に存在する歪み値の割合を示す．従来法に比べ本手法は，歪み量の誤差を低減し有効であることが定量的に確認できる．歪み量の平均 2 乗誤差(RMS)も算出したところ，従来法に比べて歪み量誤差を 2% 以上削減していることが判明した．歪み量の真値が数% のオーダーであることを考慮すると，移動量誤差は 0.1 pixel 程度の向上であるものの，2% 程度の歪み量誤差の低減は大きく，本手法は歪み分布計測に有効であることが分かる．しかし，サブピクセル誤差に起因すると考えられる縞状の揺らぎが，ノイズとなって現れるため歪み分布の可視化を困難にしている．このため，算出移動量のサブピクセル誤差を更に低減する必要があると考えられる．

5. 結言

本研究では，不均一な力学特性を有する構造物に対する有限要素解析に基づき，変形前後のシミュレーション OCT 画像の構築を行った．また，OCS 法を適用し，有限要素解析の結果と比較することにより，本手法の定量評価を行った．その結果，移動ベクトル量の誤差は OCT 分解能以下に達成することが定量的に示され，その有用性が示唆された．

参考文献

- 1) Ik-Kyung Jang, et al.: J. Amer. Coll. Card., Vol. 39, No. 4 (2002) pp. 604-609.
- 2) J. M. Schmitt: Journal of selected topics in quantum electronics, Vol. 5, No. 4 (1999) pp. 1205-1215.
- 3) S. Saeki, et al.: Trans of JSME, Ser. A, vol. 72, No. 720 (2006), pp. 159-164.
- 4) D. P. Hart: Exp. Fluids, Vol. 10 (2000) pp. 13-22.