1 1 8 乳腺組織における超音波歪計測に基づく せん断弾性定数空間分布の可視化

炭 親良 (上智大学・理工), 久保田 光博 (東海大学・医)

Ultrasonic Strain-measurement-based Visualization of Shear Modulus Distribution on Breast Tissues

Chikayoshi Sumi, and Mitsuhiro Kubota

ABSTRACT

We have developed the ultrasonic (US) strain measurement-based elasticity computed tomography for diagnosis of soft tissues. Specifically, we developed the iterative rf-echo phase matching method that provides us considerably accurate estimates of strains generated *in vivo* in soft tissues due to spontaneous heart motion/extracorporeally applied pressures. Moreover, we have developed a numerical method for stably reconstructing the relative shear modulus distribution with respect to reference shear moduli only from the measured strain data. We also developed the proper configuration method of mechanical sources/reference regions for stably reconstructing it. Since we could verify the feasibility of each method through simulations, and phantom experiments etc, we here focused our attention on application to breast tissues, and unified the methods into a technique by conducting experiments using *in vitro* pork rib. Finally, we showed a sample shear modulus image obtained on the breast tissue of a healthy volunteer.

Keywords : Ultrasonic-strain-measurement-based elasticity computed tomography (CT), shear modulus, reconstruction, strain measurement, rf-echo phase matching, regularization method, *in vivo* breast, *in vitro* pork rib

1. 緒論

生体軟組織の性状鑑別を非侵襲的に実現すべく、超音波周波数に比べて極めて低い周波数の弾性(力学的)特性の空間分布を画像化する弾性 CT の開発に取り組んでいる。具体的には、心拍と同期して生じる自然性の組織内歪や体表より積極的に圧迫することにより生じせしめた組織内歪を超音波エコー法に基づいて計測し、最終的に組織内のせん断弾性定数空間分布を再構成する[1],[2]。歪計測に関しては、これまで、シミュレーション、ファントム実験、豚ばら肉 *in vitro* 実験、ヒト乳腺 *in vivo* 実験を通じて計測精度の向上を図ってきた[3]-[9]。その結果、rf エコー位相マッチング法なる一手法を得ている。本法を用いれば、乳腺組織において、 10^{-3} オーダーの微小歪を 1 mm 以下の空間分解能で評価できることを確認している。また、弾性定数空間分布の再構成法としては正則化法を応用した手法を考案し、歪計測を含めたシミュレーションを通じてその実行可能性を確認した [10]-[14]。ここでは、測定対象を乳腺組織に絞り、ブタばら肉を用いた *in vitro* 実験を通じて手法全体としての洗練化を図り、最終的に乳腺組織のせん断弾性定数空間分布のイメージング化を試みた。

2. 方法

体表組織にて再構成を行なう場合、圧迫する際の障害物(骨など)が存在せず、また、巨視的には層状構造をなすことから、超音波探触子そのものでビーム方向(x)に圧迫することにより、本再構成問題を各ビームライン上(y)における一次元逆問題(初期値問題)に簡略化することがで

きる [1]。

$$\varepsilon_{xx}(x,y) \frac{\partial}{\partial x} \ln G(x,y) = -\varepsilon_{xx,x}(x,y)$$

従って、圧迫前後に取得した rf エコーデータから位相マッチング法を用いて組織内歪空間分布 $\varepsilon_{xx}(x,y)$ を測定し、理論的には各ライン y にて参照点 (x,y) との歪の比を評価することにより弾性定数 $G(x,y)$ の相対的な空間分布を評価できる [5]。しかし、実際には、測定ノイズのために再構成が不可能となる特異点が生じるので、上記再構成法を適用することとした[10]-[14]。関心領域内の未知のせん断弾性定数空間分布 g は、参照領域内の参照弾性定数に対して、

$$\text{error}(g) = |e - EDg|^{2+\alpha_1} |Dg|^{2+\alpha_2} |D^T Dg|^2$$

なる汎関数を g に関して最小化することによって得られる。但し、 E 、 D 、 e は、各々、上記微分方程式および初期条件を有限差分法を用いて離散化した際に導出される $\varepsilon_{xx}(x,y)$ の分布値から成るマトリクス、微分作用素の近似

マトリクス、 $\varepsilon_{xx,x}(x,y)$ の分布値から成るベクトルであり、

α_1 および α_2 はいわゆる正則化パラメータである。尚、本実験においては、処罰項としてラプラシアン項のみを用いた($\alpha_1=0$)。

3. ブタ *in vitro* 実験

Fig. 1: B-mode image obtained on the *in vitro* pork rib under pre-compression (ROI size: 15.6 mm x 72.8 mm).

Fig. 2: Measured strain distribution $\epsilon_{xx}(x, 21.8)$.

Fig. 3: Reconstructed relative shear modulus distribution. (a) $G(x, 21.8)/G(0.75, 0)$, and (b) image in the log gray scale with the dynamic range of 38.6 dB.

屠殺後6時間経過したブタばら肉を用いた。圧迫前後に取得した2次元rfエコー信号(中心周波数: 3.5 MHz。Fig. 1: 圧迫前における関心領域(15.6 mm (x) × 72.8 mm (y))内の超音波 B-mode 画像。)に位相マッチング法を適用し、歪空間分布 $\epsilon_{xx}(x, y)$ を評価した。空間分解能は 1 mm である。Fig. 2 に $\epsilon_{xx}(x, 21.8)$ を示す。x = 12.9 mm において特異点を確認した (歪の値: 2.37×10^{-5})。

次に、参照領域をライン x = 0.75 mm とし、ライン上の各点の参照弾性定数 $G(0.75, y)$ を点(0.75, 0)との歪の比で近似した。Fig. 3 に再構成結果を示す。Fig. 3(a)は $G(x, 21.8)/G(0.75, y)$ であり、これより特異点においても相対値が安定に評価されたことを確認できる (実線)。正則化を行なわなかった場合の結果も図中に示しておく (点線)。関心領域内にはこの他に 5 ポイントの特異点が存在したが、同様な結果を得た。Fig. 3(b)は、正則化時に得られた再構成画像(256 階調、ダイナミックレンジ: 38.6 dB)である。低い弾性定数部位を明るく表示したところ、筋肉および脂肪の層状構造が良好に描出された。

4. ヒト乳腺 *in vivo* 実験

Fig. 4: Elasticity images obtained on the *in vivo* breast tissue. (a) Conventional B-mode image under pre-compression, and (b) reconstructed absolute shear modulus image in the log gray scale with the dynamic range of 41.7 dB.

37 歳の健康なボランティアの乳腺組織において得られたせん断弾性定数画像を示す。ここでは、絶対的なせん断弾性定数の空間分布を画像化するために、弾性定数が既知である寒天ファントム (2.8×10^5 N/m²) を参照物質 (厚み: 45 mm) として超音波探触子と胸部の間に挟み、圧迫前後のエコーデータを収集した。Fig. 4(a)は関心領域 (16.6 mm × 23.3 mm) 内の B-mode 画像である。参照領域をライン x = 2.8 mm とし、Fig. 4(b)の再構成画像を得た。空間分解能は 1.5 mm であり、ダイナミックレンジは 41.7 dB である (2.8×10^4 N/m² から 3.4×10^6 N/m²)。せん断弾性定数画像の関心領域右下部分において、B-mode 画像からは読映の困難な乳腺らしきものが硬いものとして描出された。

5. 結言

乳腺組織におけるせん断弾性定数イメージング法の実行可能性が確認された。現在、臨床データの収集を図っている。

参考文献

- 炭, 他, 日本 ME 学会講演論文集, vol. 31, p. 390, 1993 年 5 月.
- , IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. 42, no. 2, pp. 193-202, February 1995.
- , IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr., vol. 46, no. 1, pp. 158-166, 1999.
- , Proc. 1997 IEEE Ultrason. Symp., pp. 1521-1526, October 1997.
- , 日超医大会抄録集, vol. 69, p. 345, 1997 年 5 月.
- , Proc. 7th Congress of WFUMB, p. 1-14-1, July 1994.
- , IEICE Trans. Fundamental, vol. E78-A, no. 12, pp. 1655-1664, December 1995.
- , 日本 ME 学会講演論文集, vol. 35, p. 171, 1997 年 4 月.
- 久保田, 他, 日超医大会抄録集, vol. 68, p. 285, November 1996.
- 炭, 他, 日超医大会抄録集, vol. 67, p. 291, 1996 年 6 月.
- , IEEE Trans. Medical Imag., vol. 17, no. 3, pp. 419-428, June 1998.
- , Proc. 1996 IEEE Ultrason. Symp., pp. 1325-1329, November 1996.
- , Proc. of 20th Annual Int. Conf. of the IEEE Engrg. in Med. & Biol. Soc., pp. 826-829, October 1998.
- , 日超医基礎研究部会資料, vol. BT-98, pp. 11-13, 1998.