

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 18 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K20752

研究課題名（和文）体圧分布測定装置を用いた生体縦弾性率推定技術の開発

研究課題名（英文）Development of elastic modulus estimation technology using pressure distribution measuring device

研究代表者

村上 知里（MURAKAMI, Chisato）

日本大学・理工学部・助教

研究者番号：30733753

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の最終目標は、体圧分布測定装置で取得した圧力分布から軟部組織の厚みと縦弾性率を同時に推定する技術の開発である。本研究では、生体の軟部組織と同程度の硬さを持つゲル試験片を活用し、実験値を考慮した軟部組織のモデルを構築した。まず、軟部組織の厚み・縦弾性率・圧力の関係についてモデリングを行い、一種類の縦弾性率を持つ軟部組織と、異なる縦弾性率を持つ軟部組織のばねモデルを考えた。次に、縦弾性率推定方法を作成し、軟部組織厚み推定と縦弾性率推定を反復的に実行することで、妥当な変形量と縦弾性率を求める方法を提案した。最後に、多層軟部組織における縦弾性率推定方法の適用について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

縦弾性率を推定可能な従来技術として、超音波やMRIを用いたエラストグラフィ技術が存在する。これらのエラストグラフィ技術は、高分解能な計測が可能であるが、簡便ではない。また、これらの装置は、使用時に座位が困難であるなど、体位に制限が多い。一方、体圧分布測定装置を使用する提案方法は、安価・簡便・携帯性が高いという特徴から、大病院をはじめ、在宅医療や小規模の医療機関での活用も考えられる。研究成果の将来的な効果として、体圧分布測定装置のシートセンサ上で座位や臥位をとることで、DTIの早期発見に有用な生体内部の情報を入手可能になることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：The goal was to develop a method that simultaneously estimates the thickness and longitudinal elastic modulus of soft tissue from the pressure distribution obtained by a measuring device. In this study, we constructed a soft tissue model considering experimental values using test gel pieces, which have a similar hardness to the soft tissue of a human body. First, we modeled the relationship between soft tissue thickness, longitudinal elastic modulus, and pressure. We considered spring models for soft tissues with one type of longitudinal elastic modulus and soft tissues with different longitudinal elastic moduli. Next, we developed a method for estimating the longitudinal elastic modulus. We proposed an estimating method to obtain deformation and longitudinal elastic modulus by iteratively estimating soft tissue thickness and longitudinal elastic modulus. Finally, we considered an application of the longitudinal elastic modulus estimation method to multi-layered soft tissues.

研究分野：福祉工学

キーワード：圧力分布 褥瘡 機械学習

## 1. 研究開始当初の背景

主な褥瘡好発部位は、骨突出の周辺であり、高い圧力値を観測することが知られている。褥瘡予防のためには、このような骨突出周辺の力を分散すればよい。Force sensing array (Vista Medical, Canada)などのシート状の体圧分布測定装置は、体圧分散を可視化できるため、研究や臨床現場で利用されてきた[1]。近年では、皮膚表面から進行する褥瘡だけでなく、皮膚表面に異常はないが深部組織に損傷を起こす Deep Tissue Injury (DTI)への関心が高まっている。DTIでは、体圧分布の情報だけでなく、身体内部の応力や筋・脂肪などの軟部組織の厚み(具体的には、骨から皮膚表面までの距離)に関する情報が重要である。応力の実計測は困難であるため、有限要素解析法などによる生体シミュレーションが行われている[2]。一方、軟部組織の厚みを観察するために、MRIやX線検査装置、超音波診断装置が用いられている。しかし、これらの方法は、装置や設備費用が高額であり、使用に専門的な技術と資格が必要である[3]。また、座位計測が困難であり携帯性がないことから、在宅医療における褥瘡予防や治療の一環としてこれらの装置を使用することは実用的でない。

これらの課題を解決するため、これまでに、体圧分布測定装置で取得した座位時の圧力分布から軟部組織の厚みを推定する方法を開発した。この推定方法は、まず、殿部の三次元モデルを用意しておき、取得した圧力分布との位置合わせを行うことで、シートセンサ上でヒトがどのような姿勢であるのかを把握する。その後、各センサセルに対し、一つのばねで軟部組織の弾性特性を近似した推定式について逆問題を解くものである。さて、圧力 $P$ で変形した軟部組織の厚み $\hat{L}$ を推定する際、便宜的に縦弾性率 $\hat{E}$ を圧力 $P$ から推定する。しかし、縦弾性率 $\hat{E}$ に関する推定誤差の評価は行っておらず、精度が不明である。縦弾性率推定方法を確立することができれば、軟部組織の厚みと縦弾性率を同時に推定することが可能になる。

縦弾性率を推定可能な従来技術として、超音波やMRIを用いたエラストグラフィ技術が存在する[4]。病変検知などに利用されており、褥瘡治療・予防分野においてもDTI評価方法として期待されている。これらのエラストグラフィ技術は、高分解能な計測が可能であるが、簡便ではない。一方、体圧分布測定装置を使用する提案方法は、安価・簡便・携帯性が高いという特徴から、大病院をはじめ、在宅医療や小規模の医療機関での活用も考えられる。研究成果の将来的な効果として、体圧分布測定装置のシートセンサ上で座位や臥位をとることで、DTIの早期発見に有用な生体内部の情報を入手可能になることが期待できる。

## 2. 研究の目的

本研究の最終目標は、体圧分布測定装置で取得した圧力分布から軟部組織の厚みと縦弾性率を同時に推定する技術の開発である。生体における軟部組織の縦弾性率は、非侵襲的な直接計測が困難である。直接計測が困難な物理量を間接的に推定する方法として、入出力値の関係を任意の関数でモデリングし、得られた近似式を用いて物理量を推定する方法が存在する。この方法は複雑な現象をモデリングする場合に大変有効である。しかし、実際の物理現象をどの程度表現できているのかが不明なため、このようなモデルの信頼性は低い。そこで、本研究では、生体の軟部組織と同程度の硬さを持つゲル試験片およびゲルファントムを活用し、実験値を考慮した軟部組織のモデルを構築する。物理法則に従って構築したモデルに実験値由来のパラメータを組み込むことで、モデルの表現範囲と信頼性を保障する。そして、軟部組織のモデルを数式化し、軟部組織の厚み・縦弾性率推定アルゴリズムを構築する。

これまで、軟部組織の厚みや縦弾性率を取得可能な手段は、X線検査装置やMRI、超音波診断装置など的高額な装置であった。これらの装置は、使用時に座位が困難であるなど、体位に制限が多い。提案方法によれば、安価な装置と簡便な操作により、軟部組織の厚みと縦弾性率の同時取得が可能になる。

### 3. 研究の方法

目標を達成するため、次の三点を検討した。

#### (1) 軟部組織の厚み・縦弾性率・圧力の関係のモデリング

これまでに開発した軟部組織厚み推定方法をもとに、軟部組織の厚み・縦弾性率・圧力の関係のモデリングを行った。

#### (2) 縦弾性率推定方法の構築

まず、縦弾性率推定方法の構築を行った。縦弾性率推定方法では、体圧分布測定装置で計測された圧力 $P_{i,j}$ から縦弾性率 $E_{i,j}$ を推定した。

次に、縦弾性率推定方法の推定精度の評価を行った。ゲル材料を生体軟部組織の代用とし、軟部組織の縦弾性率に相当する硬さの試験片を作製した。ゲルなどの材料に関する力学特性試験であるJIS K 6254の圧縮試験方法に従い、変形量と縦弾性率、力を取得した。寸法を変更した8種類の円柱型試験片を作製し、それぞれ3回の測定を行った。この測定データを使用して、縦弾性率 $\hat{E}_{i,j}$ を推定した。精度の評価指標は次式に示すNRMSEとした。

$$\frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\hat{E}_k - E_k)^2}}{E_{\max} - E_{\min}} \quad \dots (4)$$

ここで、 $N$ はデータ点数、 $E_{\max}$ は縦弾性率の最大値、 $E_{\min}$ は縦弾性率の最小値である。

#### (3) 多層軟部組織における縦弾性率推定方法の開発

異なる硬さを持つゲルを接合し、多層の軟部組織を模したゲル試験片を作製した。前述(2)と同様の圧縮試験を行い、縦弾性率推定方法の適用について検討した。

### 4. 研究成果

#### (1) 軟部組織の厚み・縦弾性率・圧力の関係のモデリング

図1は軟部組織厚み推定方法で仮定したばねモデルである。体圧分布測定装置のセンサシートにヒトが座していると仮定したとき、ある1個のセンサセル $(x_i, y_j)$ では、圧力 $P_{i,j}$ が検出できる。センサセルの法線方向( $z$ 方向)には生体が配置され、 $xy$ 平面は皮膚表面、法線方向に骨表面を仮定した。皮膚表面から骨表面までの縦弾性率 $E_{i,j}$ とした。図1(a)は皮膚表面から骨表面までの軟部組織を一種類の縦弾性率で単純化した図である。

さらに、実際の軟部組織は異なる縦弾性率を持つ脂肪層や筋層などで構成されている。そこで、図1(b)では、異なる縦弾性率 $E_{A i,j}$ と $E_{B i,j}$ が直列に接続された多層ばねモデルを考えた。

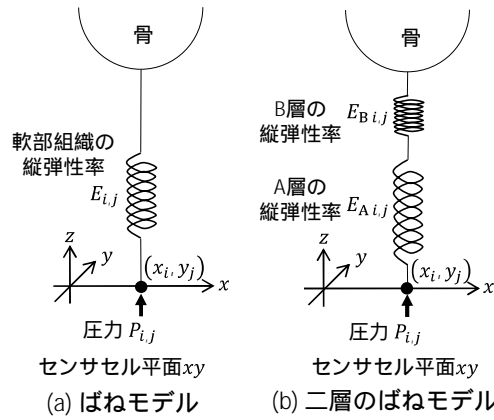


図1 縦弾性率に関するばねモデル

(2) 縦弾性率推定方法の構築

まず、縦弾性率推定方法について述べる。縦弾性率 $E$ は次式で定義される。

$$E = \frac{F}{S\varepsilon} \quad \dots (1)$$

ここで、 $F$ は力、 $S$ は断面積、 $\varepsilon$ はひずみである。本研究では、力 $F$ は圧力 $P$ に依存した量であると考えた。また、断面積 $S$ は体圧分布測定装置のセンサセルと仮定した。さらに、ひずみ $\varepsilon$ は次式で定義される。

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \dots (2)$$

ここで、 $\Delta L$ は変形前の長さ $L_0$ と力 $F$ による変形後の長さ $L$ の差(変形量)である。変形量 $\Delta L$ は軟部組織厚み推定方法で推定できる量である。以上から、(1)に(2)を代入すると次式が得られる。

$$\hat{E}_{i,j} = \frac{F L_0}{S \Delta \hat{L}} \quad \dots (3)$$

軟部組織厚み推定と本研究で提案する縦弾性率推定により、縦弾性率 $\hat{E}_{i,j}$ と変形量 $\Delta \hat{L}$ を反復的に計算することで、妥当な縦弾性率 $\hat{E}_{i,j}$ と変形量 $\Delta \hat{L}$ を求めることができると考えた。

次に、縦弾性率推定方法の推定精度の評価を行った。JIS K 6254の圧縮試験方法に従い、変形量と縦弾性率、力を取得した。8種類の円柱型試験片(表1)を作製し、それぞれ3回の測定を行った。この測定データから機械学習を使用して縦弾性率 $\hat{E}_{i,j}$ を推定し、NRMSEを算出した結果を表2に示す。

表1 円柱型試験片の寸法

名称	直径 (mm)	長さ (mm)
gel0-02	47.50	23.20
gel0-03	66.25	21.00
gel0-04	65.55	21.60
gel0-05	84.00	22.45
gel0-06	85.00	20.45
gel0-07	82.85	24.05
gel0-08	82.25	18.75
gel0-09	108.8	19.80

表2 試験片に対する NRMSE

名称	1回目	2回目	3回目
gel0-02	3.19	4.68	3.19
gel0-03	4.02	3.84	3.34
gel0-04	3.29	2.92	3.80
gel0-05	2.92	5.63	5.77
gel0-06	2.60	2.62	2.71
gel0-07	2.64	2.54	2.48
gel0-08	2.89	3.60	2.51
gel0-09	3.02	4.74	3.40

### (3) 多層軟部組織における縦弾性率推定方法の開発

縦弾性率推定方法の適用について検討した。2種類の硬さ(1, 2)を用いて結合したゲル試験片は、直径 17.17 mm、長さ 27.12 mm であった。前述の(1)(2)から、次式のように線形結合した。

$$E = \frac{F}{S\varepsilon} = \frac{F L_0}{S \Delta L} = \frac{F L_{0,1} + L_{0,2}}{S \Delta L_1 + \Delta L_2} \dots (5)$$

ここで、変形量 $\Delta L_1$ は硬さ 1 のゲルにおける変形前の長さ $L_{0,1}$ と力 $F$ による変形後の長さ $L_1$ の差、変形量 $\Delta L_2$ は硬さ 2 のゲルにおける変形前の長さ $L_{0,2}$ と力 $F$ による変形後の長さ $L_2$ の差である。その結果、線形結合とした場合であっても誤差 0.66 %で計算できることが確認できた。

以上のことから、多層軟部組織の縦弾性率推定では、線形結合として推定処理を行うことを決定した。この結果をまとめ、論文を投稿する予定である。

### 参考文献

- [1] T. H. Bui, D. Pradon, P. Lestriez, K. Debray, R. Taiar, B. Guillon, " Influence of different types of wheelchair cushions for pressure ulcers in view of the experimental approach," Proceedings of the IASTED International Conference, pp.164-167. 2017.
- [2] M. Makhsous, D. Lim, R. Hendrix, J. Bankard, W. Z. Rymer, F. Lin, " Finite Element Analysis for Evaluation of Pressure Ulcer on the Buttock: Development and Validation," IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering December, Vol.15, No.4, pp.517-525, 2007.
- [3] 水原章浩, " 褥瘡エコー診断入門 アセスメントとケアが変わる ", 株式会社医学書院, 2012 .
- [4] 荒木力, " エラストグラフィ徹底解説 ", 株式会社学研メディカル秀潤社, 2016.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Chisato Murakami, Yasuaki Kaneda, Kohki Nagata, Mamoru Ohara, Makoto Takahashi	4. 巻 18
2. 論文標題 A study on thickness estimation of human soft tissue in a sitting position using a pressure mapping system	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 394-400
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/tee.23735	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 古澤航平, 鈴木史恭, 村上知里
2. 発表標題 圧力分布測定装置を用いたヒト座位の内部構造推定アプリケーションの開発
3. 学会等名 電子情報通信学会2021年総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村上知里, 金田泰昌, 高橋誠
2. 発表標題 座面圧力分布を用いた軟部組織の厚み推定に関する基礎検討
3. 学会等名 第21回日本褥瘡学会学術集会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	金田 泰昌  (KANEDA Yasuaki)  (20463010)	地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター・研究開発本部情報システム技術部通信技術グループ・上席研究員    (82670)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	高橋 誠  (TAKAHASHI Makoto)  (10154858)	日本医療大学・保健医療学部・教授    (30127)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関