

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：13903

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2014

課題番号：26540082

研究課題名(和文) 膠原繊維を考慮した皮膚の3次元力学構造に基づく触覚解析モデルの開発

研究課題名(英文) Development of a Tactile Analysis Model based on 3-D Mechanical Structure of Skin Considering Collagen Fibers

研究代表者

田中 由浩 (Tanaka, Yoshihiro)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：90432286

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：皮膚は、機械受容器に対してメカニカルな情報処理を担っており、触覚において重要である。本研究では、従来均一としてモデル化されることが多かった皮下組織について、膠原繊維に注目し、これを含んだ皮膚構造の3次元モデルを構成、皮膚に入力された機械刺激がどのように機械受容器に捉えられるかシミュレートできる皮膚の触覚解析モデルを構築することを目指した。まず、2次元モデルを用いてモデルの妥当性の検証し、動解析により、膠原繊維が触覚の高感度や広受容野に貢献している可能性を示した。また、サルの手指から連続断面標本を作製し膠原繊維の3次元分布を観察した。

研究成果の概要(英文)：Skin is important for tactile sensation since the skin works for mechanoreceptors as mechanical signal processing. This study has focused on collagen fibers within subcutaneous tissue, which has been often analyzed by using a uniform model, and proposed a new skin model including collagen fibers. The aim of this study is a development of a 3-D skin model capable of simulating the transmission of mechanical stimuli given the skin to mechanoreceptors. First, the proposed model was verified by using 2-D model compared to previous studies, and dynamic analysis using the proposed model showed that collagen fibers contribute high sensitivity and broad receptive field for tactile sense. Then, consecutive transverse cross-sectional samples of a postmortem *Macaca fuscata*'s finger were created and 3-D texture of collagen fibers was observed under a microscope.

研究分野：触覚、ロボティクス、メカトロニクス

キーワード：触覚 皮下組織 膠原繊維 パチニ小体 歪エネルギー密度 触覚センサ 皮膚 広受容野

### 1. 研究開始当初の背景

我々は触覚を通じて、対象との接触検知、対象の繊細な把持や操作、テクスチャー評価などを実現しており、触覚は外界と身体との力学的な関係を知覚する上で必要不可欠である。一方、視覚や聴覚と比べ、触覚の研究開発は進んでいない。機械刺激を受容する個々の機械受容器の特性は明らかになっていないが、機械刺激は皮膚を介して時空間的に捉えられており、実際の知覚に利用される情報の特定が難しく、原理解明が進んでいないためである。皮膚は、表皮、真皮、皮下組織の三層構造となっており、4種の機械受容器が規則的に分布している。皮膚は、機械受容器に対してメカニカルな情報処理を担っているといえ、触覚を考える上で無視できない。とりわけ、表皮、真皮については構造的特徴が力学的に解析されているが、皮下組織については均一なモデルとすることが多く、詳細に力学的特徴が考察されていない。

ここで研究代表者は、皮下組織に関する解剖学的観察から、皮下組織に含まれる膠原繊維の分布に基づく力学的作用の可能性に注目した。皮下組織は脂肪を多く含み、非常に柔らかい組織であるが、膠原繊維があることで柔軟性に力学的な強度を与え、機械刺激を内部に伝搬・拡散する効果が推測される。皮下組織の力学的作用の特徴や原理を捉え、皮膚の精密な力学解析モデルが構成できれば、機械刺激がどのように機械受容器に入力されるかを解析可能になり、触覚の原理解明や触覚デバイス/デザインの研究開発を飛躍的に発展させる。これまでに、簡単な2次元モデルで、膠原繊維が内部に発生する応力を拡散する効果を有する可能性を確認した。しかしながら、解析は静的なものであり、またモデルも3次元構造を有していない。

### 2. 研究の目的

上記の背景に基づき本研究では、皮下組織における膠原繊維に注目し、これを含んだ皮膚構造の3次元力学モデルを構成、皮膚に入力された機械刺激がどのように機械受容器に捉えられるかシミュレートできる皮膚の触覚解析モデルを構築することを目指した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 2次元モデルによる先行研究との比較

2次元モデルについては、皮下組織が均一ではあるが、いくつかの先行研究がある。そこでまず、これまでに解析していた膠原繊維を考慮したモデルについて、先行研究との比較が不十分であり、モデルの妥当性の議論が必要であったため、2次元モデルを用いて従来研究との比較を行った。

図1左に、本研究で扱った2次元モデルを示す(以下、繊維付モデル)。これは、サル指の断面標本をアザン染色し膠原繊維を可視化し、顕微鏡下観察を基に、皮下組織を膠原繊維と脂肪で構成し作成したモデルで

ある。なお、前野らの先行研究で、表皮と真皮の微細構造である指紋と真皮乳頭は、皮膚への機械刺激により皮下組織内部に発生する応力分布に影響しないことが示されており[参考文献①]、本モデルからは省略した。本モデルは、厚み方向に変形のない2次元平面ひずみモデルとした。ヤング率については、前野らによってヒトの新鮮屍体から求められた、表皮、真皮、皮下組織の値[参考文献①]を参考に、表皮、真皮および皮下組織の脂肪について、それぞれ  $1.36 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、 $8.0 \times 10^4 \text{ Pa}$ 、 $8.5 \times 10^3 \text{ Pa}$  とした(膠原繊維は真皮と同じ値とし、脂肪は指全体の剛性が等しくなるように調整した)。なお、図1右に示す皮下組織を均一としたモデル(以下、均一モデル)も比較用に準備した(皮下組織のヤング率:  $3.4 \times 10^4 \text{ Pa}$ ) ポアソン比は、0.48とした。

このモデルにより得られた有限要素法による解析結果について、指の変形、脂肪の変形、応力分布の観点から比較を行った。

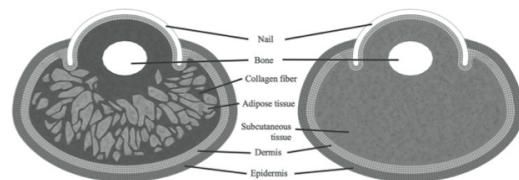


図1 指の有限要素法モデル. 左: 繊維付モデル, 右: 均一モデル.

#### (2) 動解析

動解析を行うために密度および減衰をモデルに加えた。なお、ここでは3(1)で示した2次元モデルを奥行き方向に同じ構造で厚みを持たせたモデルを用いた。密度については、前野らの先行研究を参考に  $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  とした[参考文献①]。減衰については、次の式に示すレイリー減衰を用いた。

$$\zeta = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha}{\omega} + \beta \omega \right)$$

ここで、 $\zeta$ は減衰比、 $\alpha$ および $\beta$ は、定数、 $\omega$ は角周波数である。予備実験において指腹に振動を加えた際の変形挙動から求めた減衰比と似るように、 $\alpha=2000$ 、 $\beta=0$ とした。

なお、動解析については、平面を0.3 mm押し付けた後、離した際の歪エネルギー密度(SED)を求めた。平面は1.25 msをかけて押し付けられ、その後1.25 msをかけて離される。なお、表皮と平面の間には摩擦が生じないとした。

#### (3) サル指断面の連続切片による膠原繊維の3次元分布の観察

3次元の指モデル作成のために、サル指の断面について、連続切片標本作製した。厚さ5  $\mu\text{m}$ で、指先端から第1関節付近まで、連続して薄切し、得られた標本をアザン染色した。染色した各標本について顕微鏡画像を取得し、膠原繊維、脂肪組織、および皮下組

織に分布するパチニ小体（機械受容器）の 3 次元分布の様子を考察した。また、取得した画像から、パチニ小体の画像を繋げて部分的に 3 次元構造の構築を試みた。

#### 4. 研究成果

(1) 2 次元モデルによる先行研究との比較

指の変形については、押し込み量に対する接触幅と接触力の点から比較を行った。本研究では、0.3mm 平板を押し込んだ時の接触幅を求め、接触圧分布が同心円状に広がっていると仮定して解析結果から接触力を求めた。その結果、0.3mm 押し込んだ時の接触幅および接触力は均一モデルで 2.6mm, 0.017N, 繊維付モデルで 2.2mm, 0.014N であった。前野らは、ヒトの新鮮屍体から実験的解析的に接触幅や接触力を求めており、本研究で用いたサル指のサイズが、ヒト指の約半分であったことを考慮して、前野らの結果をサル指に換算すると、0.3mm の押し込みで、接触幅 2.25mm, 接触力 0.0225N と見積もることができる[参考文献①]。したがって、本モデルでの接触力および接触幅の結果は類似した値となっていることが確認できた。なお、若干接触力が小さくなっているが、前野らが接触力を求める際に、接触面を楕円として計算しているためと考えられる。このように、ヒト指の実測に基づく先行研究と量的に類似した指変形を確認できた。さらに、Dandekar らの先行研究[参考文献②]における、ヒト指やサル指の接触力とも同程度であることが確認できた。

続いて、押し込みによる皮下組織の面積変化について比較を行った。嶋脇らの先行研究[参考文献③]では、ヒト指について平板を押し付けた際の皮下組織の面積変化が報告されている。これと本研究における繊維付モデルについての解析結果を比較した。本研究と比較して嶋脇らの先行研究では比較的大きな接触力を用いており、正確に比較することができなかったが、押し込みにより、皮下組織の面積減少が認められ、比較の結果大きく外れた数値にはなっていないことが確認できた。ただし、本モデルは実際よりやや小さな面積変化となっていた。これは、本モデルが 2 次元平面ひずみモデルで奥行き方向に変位がなかったためと考えられる。

さらに、応力分布について、ミーゼス応力を求め前野らの結果[参考文献①]と比較した。骨の中心から接触面に下ろした垂線上の応力分布の結果を図 2 に示す。解析の結果、均一モデルについて、先行研究と定性的かつ定量的に類似した結果を得られた。また、図 3 には、指断面における SED の分布を示す。SED は機械受容器の神経発火頻度との関係が示唆されている。図より繊維があることで、応力が一か所に集中せず、深部に伝わり、かつ拡散することが確認できる。

以上により、本研究で取り扱うモデルの妥当性が確認できた。

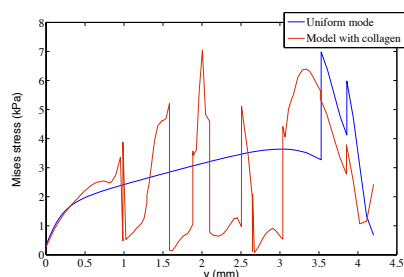


図 2 均一モデルおよび繊維付モデルにおける 0.3mm 押し込みによる解析結果 (y: 骨中心から接触面へ下ろした垂線の距離)。

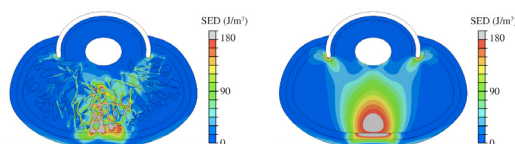


図 3 平板の 0.3mm 押し込みによる SED. 左: 繊維モデル, 右: 均一モデル。

#### (2) 減衰

3 (2) で記したモデルを用いて行った有限要素法解析の結果を図 4 に示す。図 4 には、繊維付モデルおよび均一モデルについて得られた SED が、接触後の時刻  $t$  およびその時刻の押し込み深さ  $d$  を用いて示されている。

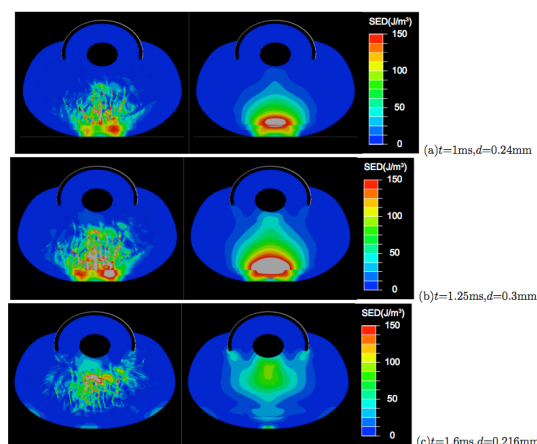


図 4 動解析結果. 左: 繊維モデル, 右: 均一モデル。

図 4 より、(a)  $t=1\text{ms}$  では、均一モデルでは押し込み直下に SED が集中しているが、繊維付モデルでは、指の深部まで、SED が伝わりることがわかる。(b)  $t=1.25\text{ms}$  では、繊維付モデルでは、左右にも応力が広がっている。(c)  $t=1.6\text{ms}$  では、均一モデルでは SED が高い箇所が見られないが、繊維付モデルでは、深部や左右に、高い SED が残って生じていることがわかる。

以上の結果から、まず、上述した 2 次元モデルにおける静解析と同様に、繊維があることで、応力を深部に伝え、拡散する傾向にあることが確認できた。また、今後、より正確な減衰などの物性値を適用して検討する必要があるが、均一モデルと比べて、皮膚への



刺激入力後、しばらく高いSEDが維持される可能性があることが解析の結果得られた。

### (3) 連続切片による指断面標本観察

アザン染色により膠原繊維を染色した連続切片の標本について、顕微鏡下観察により膠原繊維の3次元分布、パチニ小体や脂肪、骨などとの関係について考察した。図5には、手作業で位置や姿勢を調整し、立体構築したパチニ小体を示す。周辺には、膠原繊維が分布しており、今後、取得した画像を基に3次元モデルを構成できる可能性が見出せた。ただし、手作業には限界があり、誤差も含まれてしまう。今後は、取得した画像から3次元モデル構築の自動化が必要と考えられる。このために、連続切片を作成する際に、位置や姿勢の誤差を減らす必要があること、染色による濃さを均一に保つことが重要と考えられる。

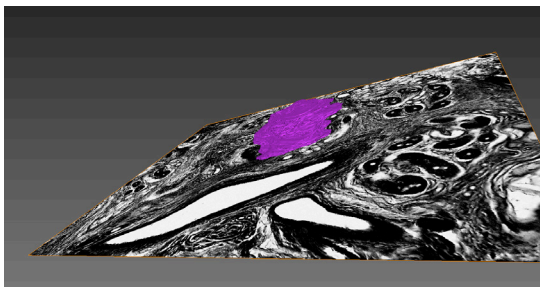


図5 連続切片標本から作成したパチニ小体の3次元形状

### (4) 今後の展望

本研究期間では、膠原繊維の3次元分布の観察はできたが、立体構築し、3次元モデルの作成には至らなかった。今後、画像処理技術の活用、連続切片作成における姿勢や位置精度向上、また、補正技術を検討していく必要がある。また、解析を基に、膠原繊維の分布を一般化し実モデルを作成して、膠原繊維による応力拡散の効果や、その際に得られる皮膚の質感について検討していきたい。

### <引用文献>

- ① Maeno T, Kobayashi K, Yamazaki N: Relationship between the structure of human finger tissue and the location of tactile receptors. JSME Int. J. Ser. C., 41, pp.94-100, 1998.
- ② Dandekar K, Raju BI, Srinivasan MA: 3-d finite-element models of human and monkey fingertips to investigate the mechanics of tactile sense. J. Biomech. Eng-Trans. ASME, 118, pp. 48-55, 2003.
- ③ Shimawaki S, Sakai N, Nakabayashi M: Mechanical deformity of the fingertip and pulp measured using magnetic resonance imaging (MRI). Trans. JSME Ser. C., 79, pp.1709-1717, 2013.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Yoshihiro Tanaka, Tatsuya Ito, Masayoshi Hashimoto, Motoaki Fukasawa, Nobuteru Usuda, and Akihito Sano: Collagen fibers induce expansion of receptive field of Pacinian corpuscles, Advanced Robotics, in press, 査読有, 2015, DOI:10.1080/01691864.2014.1003194.

[学会発表] (計2件)

- ① 田中由浩: 触知覚メカニズムの理解と活用, 日本機械学会機械力学・計測制御部門東北地区ダイナミクス&コントロール研究会, 2015年2月10日, 仙台, [招待講演]
- ② 橋本真佳, 田中由浩, 深澤元晶, 臼田信光, 肥田岳彦, 佐野明人: 膠原繊維を考慮した皮膚モデルに関する基礎検討, 第15回システムインテグレーション部門講演会(SI2014), 2014年12月14日-17日, 東京.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ

<http://drei.mech.nitech.ac.jp/~sano/>

<http://yoshihiro.web.nitech.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中 由浩 (TANAKA, Yoshihiro)  
名古屋工業大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 90432286

### (2) 研究分担者

臼田 信光 (USUDA, Nobuteru)  
藤田保健衛生大学・医学部・教授  
研究者番号: 30135123

### (3) 連携研究者

肥田 岳彦 (HIDA, Takehiko)  
藤田保健衛生大学・医療科学部・教授  
研究者番号: 20097736