

令和元年6月12日現在

機関番号：13903

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2018

課題番号：17K20003

研究課題名（和文）膠原繊維を考慮した皮下組織の3次元力学構造の解明と高感度柔軟触覚センサへの応用

研究課題名（英文）Mechanical principle of three-dimensional structure of subcutaneous tissue considering collagen fibers and its application to a high-sensitive and soft tactile sensor

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）・准教授

研究者番号：90432286

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、皮下組織の内部構造に着目し、その力学的原理の解明と柔軟で高感度な触覚センサの開発を目的とした。サル指標本に対して、ヨード染色とマイクロCTを用いることで、従来では困難であった皮下組織の3次元構造を捉えることに成功し、脂肪組織の分布の傾向を明らかにし、皮膚の非線形性への寄与を示唆した。また、膠原繊維が真皮から末節骨に向かって分布している傾向を基に、線維内蔵柔軟触覚センサを開発し、深部まで振動刺激が伝わり検出しやすくなることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

皮膚は触覚においてメカニカルな情報処理の役割を担っている。本研究では、皮下組織の持つ力学的原理を、内部構造の3次元観察と触覚センサの開発を通じて明らかにした。これは、高感度かつ柔軟な触覚センサや、操作性や安全性をもたらす人工皮膚に応用でき、人との親和性を必要とするロボットや義手、装着型のアシストデバイスなどに活用が期待できる。さらに、皮膚内部の力学的応答をシミュレートするモデルにも応用でき、触覚の知覚メカニズムの基礎研究にも貢献する。

研究成果の概要（英文）：The skin plays a role of mechanical information processing in tactile sensation. In this study, we focused on the internal structure of the subcutaneous tissue and aimed at revealing its mechanical principle and developing a high-sensitive and soft tactile sensor. By using iodine staining and microscale computerized tomography for monkey fingers, we succeeded in histological observation of the three-dimensional inner structure of the subcutaneous tissue, clarified the tendency of distribution of adipose tissue, which might provide nonlinearity characteristics for the skin. In addition, based on the tendency of collagen fibers distributed from the dermis to the distal phalanx, a soft tactile sensor embedding fibers was developed, and it was demonstrated that vibrotactile stimulation could be propagated to the deep part and be easily detected.

研究分野：触覚，メカトロニクス，人間情報学

キーワード：皮下組織 膠原繊維 触覚センサ 振動 パチニ小体 皮膚 マイクロCT 脂肪

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

人間の皮膚は、柔軟で高感度な触覚機能を有している。我々はモノに触れたときに皮膚で発生した変形や振動を、皮膚内部に分布する機械受容器で取得し、触覚を得ている。したがって、皮膚は機械受容器に対してメカニカルな情報処理の役割を担っている。

このような皮膚の力学的構造原理の解明は、学術的、社会的に高い意義を有する。触覚の知覚メカニズムは未だ未解明な部分が多い。その一因には、皮膚に入力された機械刺激が、どのように皮膚内部の機械受容器に届き知覚に利用されるか不明な点が挙げられる。機械受容器の応答を実測することは難しく、皮膚モデルによるシミュレートは極めて有効な手段となる。また、ロボットや義手、装着型のアシストデバイスなどについて、皮膚の力学的構造を基に柔軟かつ高感度な触覚センサができれば、安全性や操作性、人間との親和性を高めることができる。

皮膚は、外側から順に表皮、真皮、皮下組織の三層構造となっており、これまで表皮や真皮については、指紋や真皮乳頭といった規則的な特徴から研究がなされ、皮膚表層における応力増強やこれを基にした滑り覚センサや凹凸センサも開発された。しかし、最下層の皮下組織は一見すると規則性はなく注目されず、柔軟な脂肪で構成される組織として均一なモデルが一般的であった。皮下組織には最も感度が高く受容野が広いパチニ小体という機械受容器があり、高周波振動を検出し触覚機能として重要な接触検知、またテクスチャー識別を担当している。

これに対し研究代表者の田中は分担者の臼田らとともに、サル指の断面標本の顕微鏡観察から、皮下組織の膠原繊維の分布の特徴に気がついた。膠原繊維は固く、構造形成に関わる。膠原繊維を考慮した2次元皮膚モデルを構築し、膠原繊維が皮膚に加わった機械刺激を内部で拡散する可能性を示した[参考文献①]。さらに、連続切片の観察を行い、3次元モデル構築に向けた課題とその解決の可能性を見出した。

2. 研究の目的

上記の背景を基に本研究では、複雑な皮下組織全体の3次元構築に挑戦し、力学的構造原理の解明とセンサを開発することを目的とする。具体的には、サル指標本の観察から皮下組織の膠原繊維の分布を3次的に明らかにし、立体構造を求め、その力学的構造原理を明らかにする。さらに、その原理を基に、人間のパチニ小体を反映した柔軟で高感度な触覚センサを開発する。

3. 研究の方法

(1) 皮下組織内部構造の3次元構築および解析

これまでに皮下組織について3次元構造の解析があまり進まなかった理由には、サブミリオーダーでの生体組織の観察方法が未だ十分に確立されていないことがあげられる。マイクロフォーカスX線CT装置(MicroCT)により、細胞のような小さな組織の内部構造観察が非破壊でできるようになったが、本研究が対象とするような指の場合、骨から脂肪まで硬さが大きく異なる組織が存在し、膠原繊維や脂肪組織を区別できるほどの十分な高コントラストの断面像を取得することは困難である。また、連続切片を作成し、染色により組織を特定した上で3次元構築を試みる場合は、連続切片の作成時に生じる位置ズレにより正確な3次元構造に再構築することは難しい。一方、両者を見比べると、MicroCTによる断面像では、おおよその形状や分布を把握することはできていた。そこで造影剤を用いて、特定の組織のコントラストを向上し、MicroCTによる撮影を通して3次元構築を行うことを試みた。造影剤にはヨードを用いた。

さらに、作成された3次元データを用いて、皮下組織の膠原線維と脂肪組織の分布について観察し、特に、脂肪組織に着目して体積分布の解析を行なった。

(2) 皮下組織の膠原線維に着目した柔軟かつ高感度な触覚センサの開発

皮下組織内部の膠原線維の分布に着目し、膠原線維に相当する硬い弾性体および脂肪組織に相当する柔らかい弾性体を用いて、触覚センサを作成した。比較用に硬い弾性体を有さない均一な触覚センサも作成した。全体の剛性はほぼ等しくなるようにし、センサ素子には歪みゲージを用いて、センサの表層部と深部にそれぞれ配置した。比較では、パチニ小体を考慮し、高周波振動を与え、触覚センサの表層の複数箇所への刺激に対するセンサの応答について調べた。

4. 研究成果

(1) 皮下組織内部構造の3次元構築

サル指をヨードに浸けて染色することで、膠原線維と脂肪組織のコントラストの向上を試みた。図1に、MicroCTにて撮影した画像、および、近接箇所について、切片を作成して染色により膠原繊維や脂肪組織などを見やすくした顕微鏡画像を示す。図1に示すように、切片の顕微鏡画像の位置を基にMicroCT画像を見ると、膠原線維や汗腺、神経組織は黒く、白い部分が血管、脂肪組織、パチニ小体のいずれかであることが確認できる(白黒反転しており、実際の画像では逆)。なお、パチニ小体に関しては、中心を通る神経の部分が黒くなっており、特定できそうではあるが、解像度が十分ではなく、本研究では3次元構築時にパチニ小体の特定を行っていない。

このようにして、ヨード染色を行うことでMicroCT画像において膠原線維と脂肪組織を区別できることから、指先から末節骨あたりまでのMicroCT画像を基にサル指の内部構造の3次元

構築を行なった。3次元構築では、画像解析ソフトを用いて、ノイズ低減やスムージングを行い、脂肪組織の数が多くなるよう閾値を設定して、脂肪組織と膠原線維の領域を区別した。なお、血管や腱は構造的な特徴から特定可能であった。

得られたサル指の3次元構築結果を図2に示す。図2においては、脂肪組織を見やすくするため複数の色で示しており、血管は赤色で示している。色付けがなされていない部分は、基本的に膠原線維とみなすことができる。図より、脂肪の分布が確認でき、血管が表層側と末節骨側に走行し、その間に脂肪組織があることがわかる。その他、真皮乳頭や動静脈吻合も確認できる。脂肪組織の分布に着目すると、指先や指表面には脂肪組織がほとんど存在しないが、末節骨の周辺には脂肪組織が多数存在していること、指の深部（末節骨の下部）には大きな脂肪組織の塊が多く存在する傾向にあることがわかった。

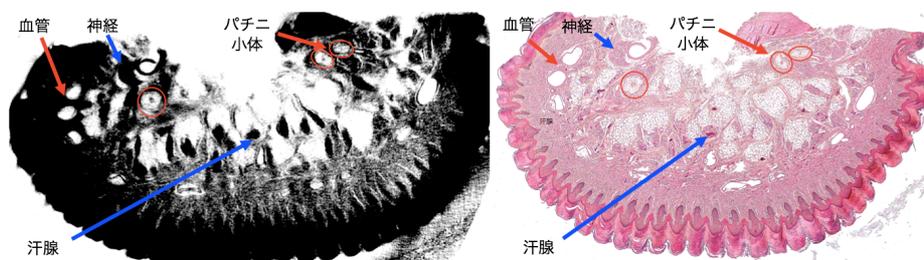


図1 ヨード染色したサル指のMicroCTによる断面画像（白黒反転）（左図）および近似箇所で作成した断面標本の顕微鏡画像（右図）

(2) 皮下組織の脂肪組織分布の解析

上記の観察結果を基に、脂肪組織の体積分布を求めた。末節骨と脂肪組織の座標データから最短の距離を求め、当該脂肪組織の体積との関係性を求めた。結果を図3に示す。図3より、末節骨に近づくにつれ、体積の大きな脂肪組織が分布する傾向にあることが確認できた。脂肪組織以外には膠原線維が多く占めており、脂肪組織と膠原線維の割合を考慮すると、指の表層付近から末節骨付近の間では、脂肪組織の割合が増加し、膠原線維の割合が減少していく傾向にあるといえる。これは、皮下組織内部において、末節骨に近づくにつれ剛性が低くなっている可能性を示唆し、本構造は、外力に対する皮膚変形の非線形性を支援している可能性が考えられる。小さな荷重には大きく変形し、大きな荷重には変形が小さくなる。この非線形性は皮膚の安全性やセンサとしての高ダイナミックレンジ、物体把持などのマニピュレーションに寄与している可能性がある。指のモデルに関する先行研究においても、多層にしたモデルの有用性が示されており[参考文献②]、本結果はこれを支持する結果といえる。

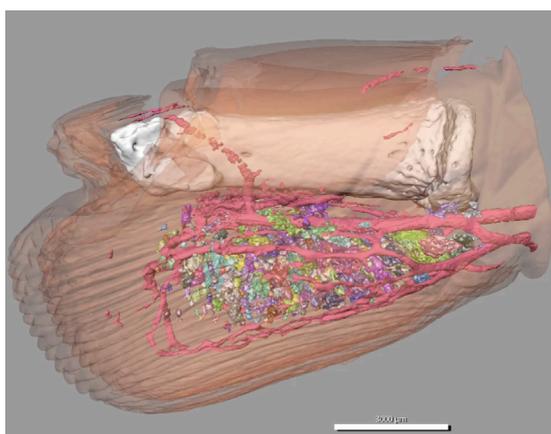


図2 サル指の3次元構築結果

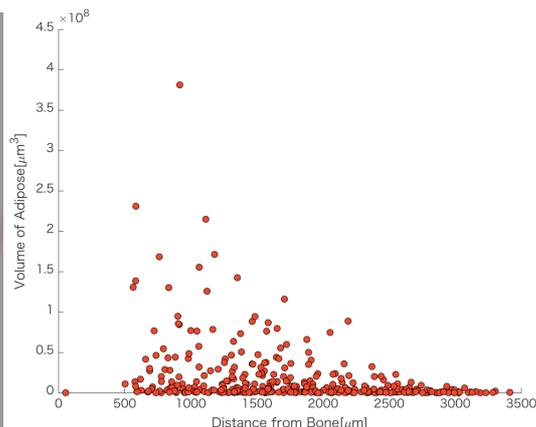


図3 サル指の脂肪組織の体積と末節骨までの距離の関係

(3) 膠原線維分布に着目した柔軟かつ高感度な触覚センサの開発

これまでに行ってきた連続切片やMicroCTによる観察を基に、膠原線維について、真皮から末節骨に向かって線維が分布している様子を見ることができ、これを参考にして表層側からセンサベース側に向かって硬い線維が集約されるような内部構造を有する柔軟な触覚センサを作成した。図4に線維モデル（1ユニット分）を示す。作成した触覚センサでは、これを3x3で配置し、脂肪組織としてウレタンゲルを充填した。歪みを検出するセンサ素子としては、3x3

のうち中心の線維の表層および中間層に歪みゲージを貼り付けた。表層のさらに上には表皮として天然ゴムシートを貼り付けた。図5に触覚センサの外観を示す。また、比較用に線維モデルを含まず当該箇所はウレタンゲルのみで構成した均一モデルを作成した。歪みゲージは線維内蔵モデルと同様の深さに配置した。全体の剛性は、いずれも0.34 MPaと同程度である。

各センサの表層の25個の点に対して、周波数200 Hz、振幅6 μm の正弦波振動を、押し込み力0.3 Nで与えて、歪みゲージからの出力を計測した。図6に結果を示す。図より表層のセンサについては均一と線維内蔵モデルで似た応答を示していることがわかる。一方、深部については、均一モデルでは応答が小さいのに対して、線維内蔵モデルにおいては比較的高い出力が確認できた。したがって、線維構造を付与することにより、高周波の振動が深い位置まで伝達し、大きなセンサ出力を得られることが確認できた。なお、他の周波数についても応答を確認したところ、400 Hz程度までは応答することが確認できた。ゴムやウレタン樹脂の高度を変えることで、応答性は今後さらに改善できると考えられる。

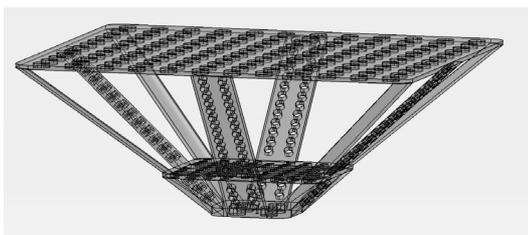


図4 線維モデル（1ユニット分）

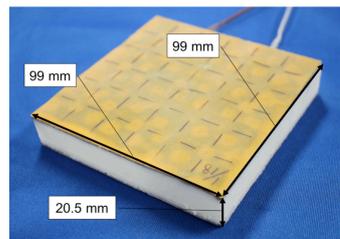
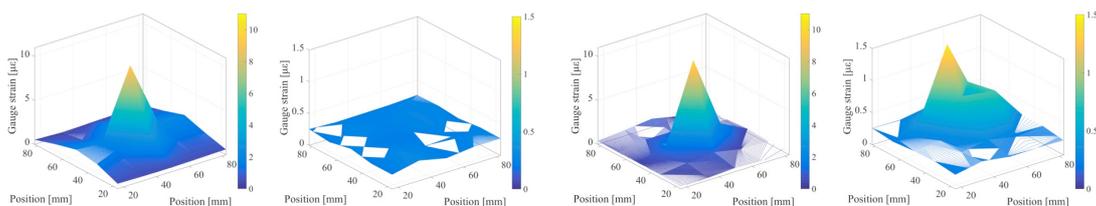


図5 線維内蔵柔軟触覚センサ



(a) 均一モデル（左：表層，右：深部） (b) 線維内蔵モデル（左：表層，右：深部）

図6 作成した触覚センサにおける高周波振動に対する表層と深部に配置した歪みゲージの出力

(4) 今後の展望

皮下組織内部構造の3次元構築により、膠原線維と脂肪組織の分布を3次的に解析することが可能となり、脂肪組織の対積分布から皮膚変形の非線形性を示唆する構造原理を得ることができた。本構造は、外部刺激に対する皮膚の安全性や、変形の範囲を広くすることができることから、ものを掴むなどのマニピュレーションに対してやセンシングにおけるダイナミックレンジに対して有用である可能性が考えられる。また、真皮から末節骨にかけて膠原線維が分布する傾向を基にした線維を内蔵した柔軟触覚センサでは、均一なセンサと比べて、深い位置まで振動刺激が到達し、センサ素子で検出することが可能であった。深い位置にセンサを配置できれば、広受容野やセンサ素子の保護に役立つ。今後は、脂肪組織の3次元分布の特性も含めた触覚センサの開発や、3次元の内部構造を有する皮膚内部応力シミュレーターを開発し、触覚メカニズムの研究やより高性能な触覚センサの開発に活用したい。また、より高解像度のMicroCTの利用や染色を検討し、パチニ小体などを特定した指内部のさらに詳細な3次元構築を試みたい。

<引用文献>

- ① Y. Tanaka, Y. Ito, M. Hashimoto, M. Fukasawa, N. Usuda and A. Sano, Collagen fibers induce expansion of receptive field of Pacinian corpuscles, *Advanced Robotics*, vol. 29, 2015, 735-741
- ② K. Dandekar, B. I. Raju, M. A. Srinivasan, 3-d finite-element models of human and monkey fingertips to investigate the mechanics of tactile sense, *Journal of Biomechanical Engineering-Transactions of The ASME*, vol. 118, 2003, 48-55.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕（計3件）

- ① 西澤順平, 田中由造, 深澤元晶, 小久保正博, 白田信光, 大竹義人, 佐野明人, MicroCTを用いたサル指内部構造の3次元構築, 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2018), 2018年12月, 大阪
- ② 西澤順平, 園井悠人, 田中由造, 深澤元晶, 白田信光, 大竹義人, 福本学, 佐野明人, 皮下組織の構造を利用した柔軟触覚センサの数値解析に関する研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2018, 2018年6月, 小倉
- ③ 園井悠人, 西澤順平, 田中由造, 深澤元晶, 白田信光, 大竹義人, 福本学, 佐野明人, ヒト皮下組織に基づく触覚センサのための線維構造の検討, 計測自動制御学会第18回システムインテグレーション部門講演会, 2017年12月, 仙台

〔図書〕（計1件）

- ① 田中由造, 触覚センサ, 前田直之, 三輪高喜, 室田浩之編集, 日本医師会, わかりやすい感覚器疾患, 日本医師会雑誌147巻・特別号(1), 2018, S315 (総ページ364)

〔産業財産権〕

- 出願状況（計0件）
- 取得状況（計0件）

〔その他〕

招待講演

- ① 田中由造, 触覚メカニズムと触覚ディスプレイ, IDW'18 チュートリアル, 2018年12月, 名古屋
- ② 田中由造, 人の触知覚メカニズムと触感デザイン, 包装技術協会関西支部セミナー第2回会員フォーラム, 2018年6月, 大阪
- ③ 田中由造, 主観的な触覚の使い方-身体性技術の効果-, 幸田町第28回サイエンスコミュニティ, 2018年1月, 愛知

アウトリーチ活動（ワークショップ, 展示会）

- ① 田中由造, 松井彩, さわりごごちのサイエンストーク~触覚研究者と見る皮膚の世界, 名古屋市科学館の企画展「さわってビックリ! 見てフシギ? 人間の皮膚」, 2017年09月, 名古屋
- ② 田中由造, 松井彩, ミライ体験「さわりごごちのサイエンス」, 名古屋市科学館, 2017年1月, 2017年7月, 名古屋

ホームページ

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

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：白田 信光

ローマ字氏名：(USUDA, nobuteru)

所属研究機関名：藤田医科大学

部局名：医学部

職名：教授

研究者番号（8桁）：30135123

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：大竹 義人

ローマ字氏名：(OTAKE, yoshito)

研究協力者氏名：深澤 元晶

ローマ字氏名：(FUKASAWA, motoaki)

研究協力者氏名：福本 学

ローマ字氏名：(FUKUMOTO, manabu)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。