

触覚通信実現を目指した触感の客観的評価

触感を伝達することのできる触覚通信の実現を目指して、触れる対象物の表面形状とヒトの指変形に伴う歪エネルギー密度の関係を、さまざまな素材に対してシミュレーションを行い明らかにした。歪エネルギー密度と触覚受容体の発火頻度の相関はすでに明らかになっており、本シミュレーション結果を用いて電気刺激触覚ディスプレイが実現できると考えられる。なお、本研究は慶應義塾大学 理工学部 機械工学科 前野研究室（前野 隆司助教）への委託研究に基づいている。

はやし こうき たかはた みのる
林 宏樹 高畑 実

1. まえがき

人間は、「視覚・聴覚・触覚・味覚・嗅覚」の五感を使うことで、人やさまざまなモノとインタラクションを行う。現在、映像と音声による遠隔通信が身近になっているが、われわれは、視覚、聴覚に次いで情報量が多いとされている触覚による通信の実現に向けて研究に取り組んでいる。触覚が持つさまざまな機能を利用することで、これまでの通信メディアだけでは実現できなかった新しい応用分野が生まれると考えられる。

生理学では、触覚は体性感覚と呼ばれ、皮下の筋肉、腱、関節などによって起こる「深部感覚」と、皮膚表面の受容器によって起こる「皮膚感覚」とに分類される[1]。深部感覚は、位置感覚、運動感覚、力覚など関節や筋肉に存在する受容器によって引き起こされる感覚である。皮膚感覚は、布の「ざらざら」、「すべすべ」といった皮膚表面で感知する感覚である。本稿では、皮膚感覚について述べる。

ドコモでは、電気刺激を用いた触覚ディスプレイの研究を行っている[2]。電気刺激により、触覚受容器に繋がる神経を刺激することで触覚受容器の発火を再現し、擬似的に触感を提示する。例えば、対象を撫でた場合の触感には、「表面形状」から「指との接触による指変形」が起こり、「指変形による触覚受容器の発火（神経インパルスの発射）」が起こり、「脳での処理による触感の認識」という過程を経ることで認識される。ヒトの認識過程には未解明の仕組みが多いが、特

に触覚ディスプレイを実現するためには「表面形状」から「指変形による触覚受容器の発火」への過程の解明が必要である。そこで、指の変形シミュレーションについて委託研究を行った。「ある触り心地を再現する際に、どのように刺激を提示すればよいか」の指標を得ることにより、触覚通信実現に向けて、大きく前進すると考えられる。

2. 触感の客観的評価

2.1 研究目的

本研究の目的は、さまざまな素材を触った際の触感を客観的に評価することである。すなわち、さまざまな素材と指との接触解析を行い、指内部の変形に伴う歪エネルギー密度（SED：Strain Energy Density）の時空間分布を求める。

また、触覚受容器の神経インパルス発火頻度は触覚受容器近傍のSEDと相関があることが分かっている[3]。この相関に基づき、表面形状とSEDの関係を明らかにすることで、表面形状と触覚受容器の発火頻度の関係を導き出す。ここで得られる触覚受容器の神経インパルス発火頻度を忠実に再現すれば、理論的にはある表面形状を触っている際の触り心地を提示できるはずである。

そこで、本研究で得られるSED分布を電気触覚ディスプレイの刺激パラメータに応用する。

2.2 触覚受容器

皮膚感覚を受容する触覚受容器は、触圧、温冷、痛の3つの感覚によって大別される。「ざらざら」、「すべすべ」などの機械的な変形・触圧を検出する受容器は、機械触覚受容器（Mechanoreceptor）と呼ばれ、マイスナー小体、メルケル盤、ルフィニ終末、パチニ小体などで構成される（図1）。それぞれについて以下に説明する。

(1) マイスナー小体

受容野*は狭い。また皮膚の振動を検出しており、20～100Hz程度の範囲で応答し、30Hz付近で最も感度が良い。皮膚の振動数とマイスナー小体の発火頻度の周波数比は、ほぼ1:1である。

* 受容野：1つの触覚受容器が検出可能な皮膚表面上の広さ。

(2)メルケル盤

受容野が狭く、皮膚の変位、すなわち圧力を検出していると言われている。メルケル盤の発火頻度は0～200Hzであり、SEDの増加に伴い発火頻度も増加する。

(3)ルフィニ終末

受容野は広い。圧力や伸びを検出していると言われているが、不明な点が多く、単独の神経電気刺激では何の感覚生起も起きない。

(4)パチニ小体

受容野は広い。100～300Hzの比較的高い振動数に反応し、200Hz付近での感度が最も良い。皮膚振動数とパチニ小体の発火頻度は、ほぼ1:1である。

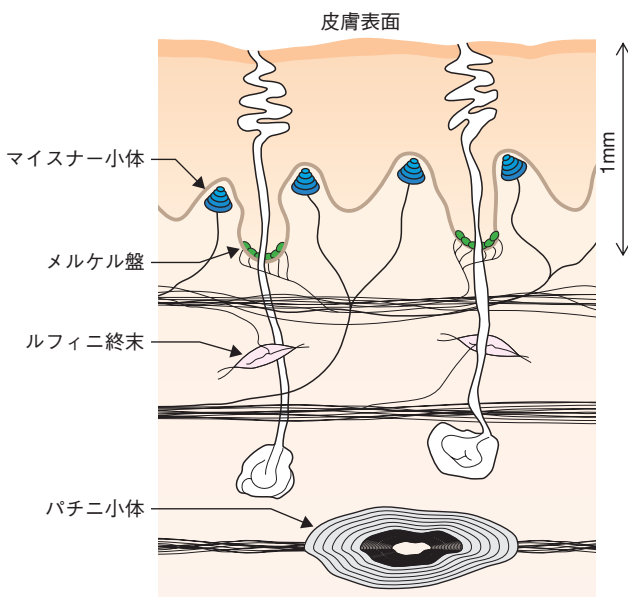


図1 機械触覚受容器

2.3 歪エネルギー密度と触覚受容器

物体表面を触った際の機械触覚受容器の活動を計測する実験として、サルの触覚受容器神経に電極を刺し、神経インパルス発火を記録する実験が報告されている[4]。

また、指腹部断面を詳細にモデル化し、有限要素解析によって刺激面との接触解析を行った[5]。その結果、上記サルの実験におけるメルケル盤の神経インパルス発火特性と、有限要素解析モデルでのメルケル盤の存在位置におけるSEDのシミュレーション結果はほぼ同じ傾向を示すことが分かった。これを基に皮膚機械受容器がSEDを検出しているものと考え、触り心地の客観的評価指標としてSEDを用いることとした。

2.4 さまざまな素材と指腹部との接触解析

(1)指腹部モデル

布や金属や樹脂などの素材は、微細な表面構造を持っている。従来の指腹部モデルでは、要素のサイズが大きいため、微細表面構造を持つ接触解析ができない。そこで、角質層を3つに細分化し、指紋部をより忠実に再現した改良指腹部モデルを用いて、各素材との接触解析を行った。改良指腹部モデルを図2に示す。記号で示した箇所は、四種類の触覚受容器が配置されている位置の節点を表す。文献[5]には、指腹部モデルの寸法、ヤング率、密度などのパラメータについて記述されている。解析には、有限要素コードMSC.MARC2005を用いた。

本解析では、全部で2.0sの接触行程を10,000ステップ(1ステップ0.2ms)で接触解析を行った。まず、剛体の凹凸パターンを0.5sの間に一定速度(触察速度)で指腹部へ0.5mm押し込み、次の0.5sで、接線方向に速度

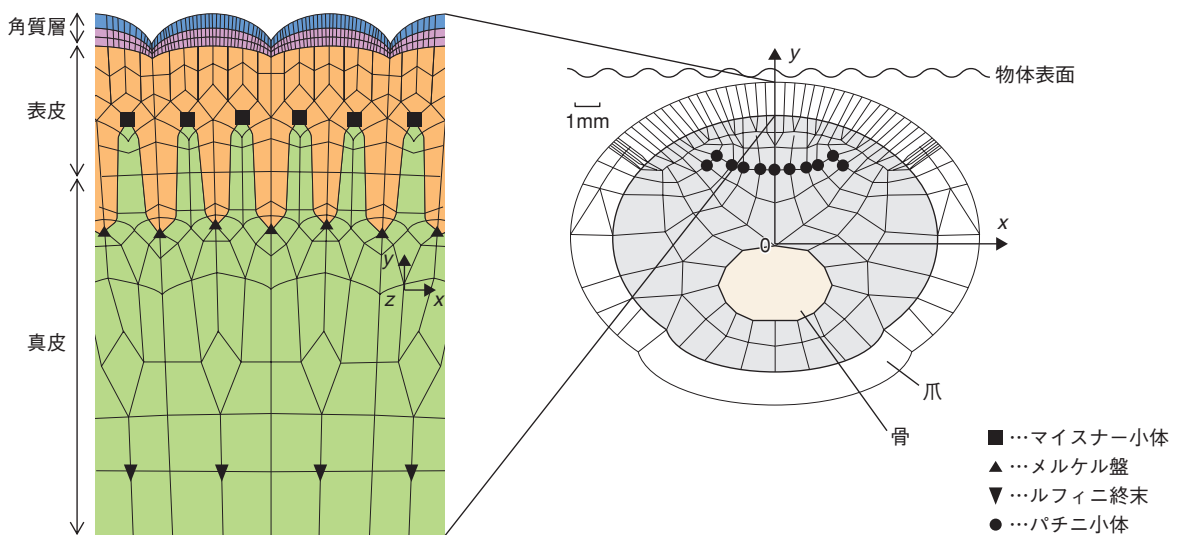


図2 改良指腹部モデル

20mm/sまで一定加速度で加速した。その後、同じく接線方向に一定速度20mm/sで1.0s滑らせた。なお、触察速度は通常、数10～200mm/s程度である。

(2) 解析素材

今回、解析する素材には、ポリエステル、アルミニウム、アクリル樹脂を選定した。触り心地は、粗さ、弾性、摩擦の機械的因子と、温度、熱伝導率などの温度因子に大きく分けられるが、ここでは、電気触覚ディスプレイで再現することを仮定し、電気触覚ディスプレイの刺激電極と熱伝導特性に近い素材を選択した。

各素材の表面形状は、超深度カラー3D形状測定顕微鏡を用いて計測を行った。この計測結果を基に2次元表面形状パターンを作成した。作成した2次元表面形状パターンのうちポリエステルの表面形状パターンを図3に示す。

また、素材の物性値であるクーロン摩擦係数をそれぞれ、ポリエステル：0.1、アルミニウム：0.3、アクリル樹脂：1.5とした。計算コストの制約から、各素材は表面

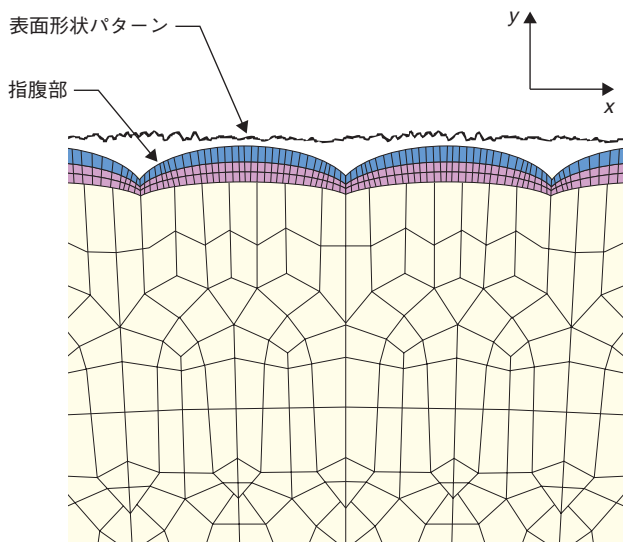


図3 ポリエステルの表面形状パターン

形状のみを再現した剛体の凹凸パターンとし、素材の弾性を考慮しないこととした。

(3) SEDシミュレーション結果

各素材について、触覚受容器位置でのSEDを求め、素材との接触時のSEDの時空間分布を求める。ここでは、代表的なものとして各素材のメルケル盤位置におけるSEDの時空間分布について、図4に示す。ポリエステル、アルミニウム、アクリル樹脂それぞれを比較すると、SEDの挙動に違いがあることが分かる。

2.5 研究成果

今回の研究で得られた成果を以下にまとめる。

- ・角質層を3層に分割することで、従来モデルよりも皮膚変形状態を精度良く再現した。これにより、従来では貫通などにより解析できなかった微小突起形状との接触解析が可能となった。
- ・各素材との接触シミュレーションの結果、各素材で指の変形挙動が異なることを示した。この特徴的な変形挙動と歪エネルギー時空間分布との関係を考察することで、従来では不明であった、素材を撫でた際の触覚受容器の活動履歴が推定可能となった。

今回構築した指腹部モデルは、凹凸パターンによる変形挙動の変化や、固着・滑り現象と触覚受容器の応答の関係など、従来では知られていなかったヒトの手触りのミクロな現象を解析するための非常に有効なツールと成り得る。

3. 触覚ディスプレイ研究への応用

3.1 電気触覚ディスプレイ

ドコモでは電気触覚ディスプレイを用いて、触覚の提示の研究を行っている。電気触覚ディスプレイの構成を図5に示す。本触覚ディスプレイを用いて、触感だけでなく、点字のように指先部に文字を提示することも考えている[6]。

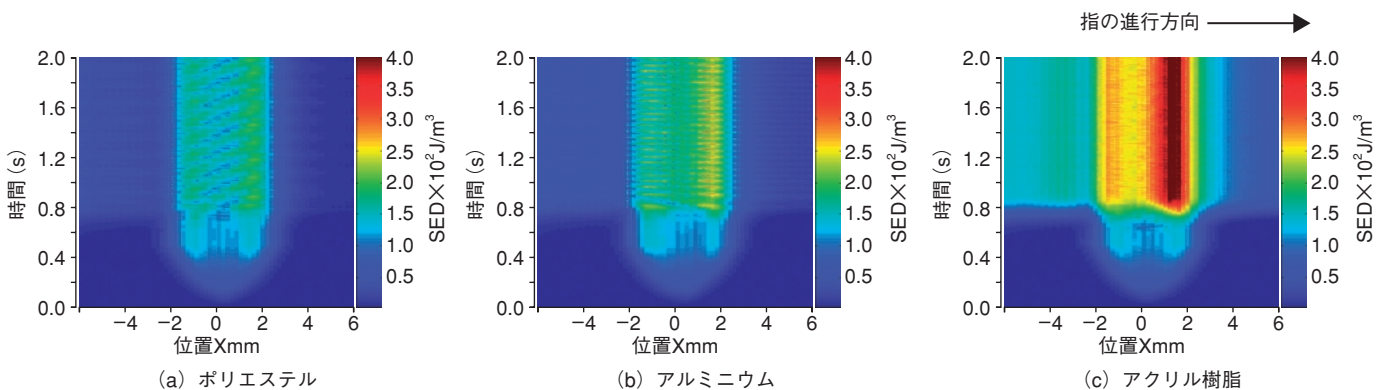


図4 メルケル盤位置におけるSEDの時空間分布

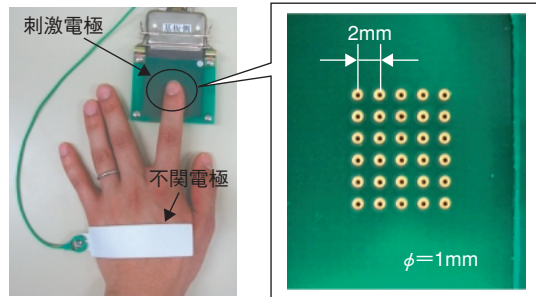
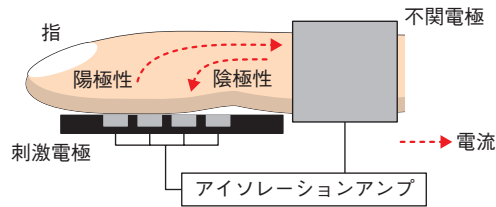


図5 電気触覚ディスプレイ構成

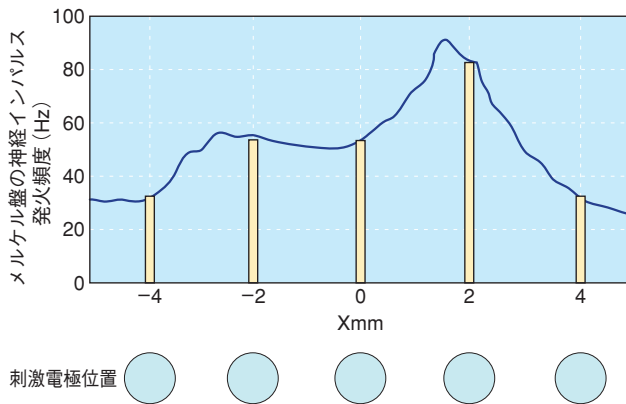


図6 各電極からの神経インパルス発火頻度

電気刺激により、触覚受容器の繋がる神経をある程度選択的に刺激できることが分かっている。指のダイナミックな変形を検出するマイスナー小体は陽極性の電流で、また、スタティックな変形を検出するメルケル盤は陰極性の電流で刺激可能である。今回の研究で得られたSEDの時空間分布を基に、電気刺激の波形パターンの指標とする。SEDとメルケル盤の神経インパルス発火頻度は相関があるため、図4の亚克力樹脂のグラフより、SEDを神経インパルス発火頻度に変換すると、1.5s後のメルケル盤の神経インパルス発火頻度のグラフは図6のようになる。

刺激電極の間隔が2mmであるため、厳密には再現できないが、図6に示すように、各電極からの出力の周波数を変化させることで、亚克力樹脂をなぞっている感覚を再現したいと考えている。

4. あとがき

今回の委託研究で精度よく指腹部をモデル化することで、微小突起との接触解析が可能となった。これにより、さまざまな素材を撫でた際の触覚受容器の活動履歴が推定可能となった。

また、得られたSEDの時空間分布を電気触覚ディスプレイによって提示することにより、その素材の手触りが再現できる。

この技術は、触覚通信を実現するうえで重要な役割を果たすと考えられる。

文献

- [1] 岩村 吉晃：“神経心理学コレクションタッチ,” 医学書院.
- [2] 林 宏樹, 平岩 明, 杉村 利明：“電気刺激触覚ディスプレイを用いた感覚閾値実験,” 日本バーチャルリアリティ学会第8回大会論文集, pp. 225-226, 2003.
- [3] M. A. Srinivasan and K. Dandekar: “An Investigation of the Mechanics of Tactile Sense Using Two-Dimensional Models of the Primate Fingertip,” Trans. ASME, J. Biomech. Eng., Vol. 118, pp. 48-55, 1996.
- [4] R. S. Johansson and A. B. Vallbo: “Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand,” TINS (Trends in Neurosciences), Vol. 6, pp. 27-32, 1983.
- [5] 前野 隆司, 小林 一三, 山崎 信寿：“ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学関係,” 日本機械学会論文集 (C), Vol. 63, No. 607, pp. 247-254, 1997.
- [6] K. Hayashi and M. Takahata: “Tactile letter recognition by Electrocutaneous Display,” Proc. 27th Annu. Int. Conf. IEEE EMBS, pp. 1817-1820, 2005.

用語一覧

SED : Strain Energy Density (歪エネルギー密度)