

# ヒト指の機構と知覚機構を模倣した触感センサ

## Development of a Texture Sensor Emulating the Tissue Structure and Perceptual Mechanism of Human Fingers

○学 向坊 由佳 (慶大) 学 白土 寛和 (慶大)  
正 昆陽 雅司 (慶大) 正 前野 隆司 (慶大)

Yuka MUKAIBO, Keio University, mukabo@mmm-keio.net  
Hirokazu SHIRADO, Keio University, shirado\_hirokazu@mtb.biglobe.ne.jp  
Masashi KONYO, Keio University, konyo@educ.cc.keio.ac.jp  
Takashi MAENO, Keio University, maeno@mech.keio.ac.jp

This paper discusses the design of a texture sensor emulating the major features of a human finger. Three physical properties, roughness, thickness/softness, and friction are known to constitute texture perception of humans. The sensor is designed to measure the three specific types of information by adopting the mechanism of human texture perception. First, four features of the human finger that were adopted in designing the novel sensor are introduced. Each feature is considered to play an important role in texture perception; the structure of the finger, the multiple layers of soft tissue, the distribution of mechanoreceptors, and the deployment of epidermal ridges. Next, detailed design of the texture sensor based on the design concept is explained, followed by evaluating experiments and analysis of the results. Finally, texture perceptive experiments of actual material were conducted using the developed sensor. Results show the potential of this approach.

**Key Words:** Texture Perception, Texture sensor, Human finger structure

### 1. 緒言

触覚の工学的応用例の一つとして様々な触覚センサが開発されてきた<sup>(1)</sup>。近年開発された触覚センサは検出する情報により二種類に大別でき、本稿ではそれぞれ「把持センサ」と「触感センサ」と呼ぶ。把持センサとはロボットハンドの把持力を制御するために指先における局所すべりを検出するセンサである。一方、触感センサとは対象物表面の質感や風合いを検出し、評価することを目的として開発されたもので、医療や化粧品業界で注目されている。しかし従来のセンサで正確な触覚情報を検出することは難しい。特に触感のセンシングにおいては、多様な情報から統合的に判断することが必要とされているため、従来のセンサでは触感の違いを十分に識別することが困難であった。そこで、本研究では、ヒト指の構造と知覚機構を模倣することによって触感検出感度の高い触感センサを開発する。

### 2. ヒトの触感検出機構

ヒト指の構造や知覚機構のさまざまな特徴が触覚に大きく関わっていると指摘されてきた<sup>(2)</sup>。本研究では触感検出に大きな影響を及ぼしていると考えられる以下の4つの特徴に着目する。

#### 2.1 指の構造

ヒトの指は皮膚、骨および爪によって構成され、楕円に近い断面形状を有する。表面が曲率を有することにより、接触面における応力分布が均一化し、多様な対象形状に対応した把持・操り動作を行うことができると考えられている。また、爪は皮膚を対象物との間に挟むことにより表面をなぞる際に生じる振動を伝えやすくする効果がある。

#### 2.2 層状構造

ヒト指の皮膚は表面から順に表皮、真皮、皮下組織という物性の異なる三層から成る。表面に近い層の剛性が高く、内部の剛性が低いような層状構造にすることにより、指を対象物に深く押し込んだ際、皮下組織が大きく変形し、皮膚表面

に近い層が対象表面形状に習うという現象が生じる。ヒト指はこれにより、安定した接触状態を実現していると考えられる。最も剛性の低い皮下組織は主に脂肪組織であり、真皮と深部の構造物の間を埋めるとともに、機械的な外力に対する緩衝材の役割を果たす。

#### 2.3 触覚受容器

ヒトの触覚は皮膚内部に配置された機械受容器により検出される。触覚受容器には、表皮に存在するメルケル小体、真皮層の真皮乳頭内部にあるマイスナー小体、深部にあるパチニ小体とルフィニ終末などがあり、外部から伝わる刺激に応じて異なる情報を検出する。例えば、マイスナー小体は速度の変化に反応し、周波数 100Hz未滿の刺激を与えた際にもっとも感度がよいといわれている<sup>(3)</sup>。

#### 2.4 指紋

表皮の表面は指紋と呼ばれる皮膚小稜をなす。指紋は触感の検出に大きく関わっているとされており、均一な法線反力分布を得るために最適な形状をしている。触運動の際に対象表面の形状に習った指紋が振動することにより触覚受容器が発火する。

### 3. 設計およびセンサの検出機構

ヒト指の構造と知覚機構をもとに、図1に示すようなセンサを設計した。センサは次のような特徴を有する

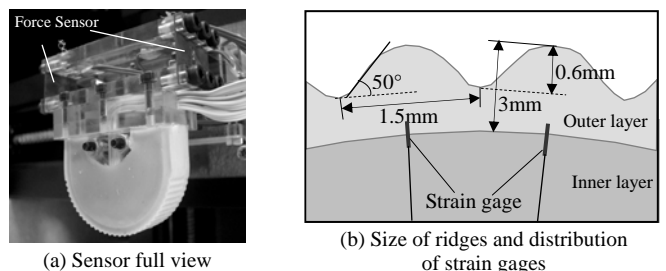


Fig. 1 Developed texture sensor

Table 1 Softness Experiment Results

Sponge	Young's Modulus (MPa)	Variance of sensor output
A	1.25	0.37
B	0.07	0.27
C	0.01	0.02

- ・ 弾性を有する接触面を実現するため、シリコーンゴムを用いて製作
- ・ 異なる弾性のゴムによる二層構造を実現
- ・ 適度な弾性をもたせるために骨・爪要素を配置
- ・ 接触面積を検出するために表面全体に曲率をもたせる
- ・ ヒトの触覚受容器の分散配置を模倣し、センサ内部に5つのひずみゲージを配置
- ・ 対象物のあらかさを測るために対象物に触れる表面に指紋を配置
- ・ センサに加わる法線力と接線力を測定するためにベース部分に2軸力センサを設置

ひずみゲージの大きさの限界から、センサの大きさはヒト指の3倍になるように45mm幅に設計した。指紋のサイズはFig.1(b)に示すとおりである。

#### 4. 触覚検出基礎実験

製作したセンサを用い、触覚検出実験を行った。前述したとおり、ヒトは複数の物理量を統合して触覚を判断していると考えられている。あらかさ感、やわらかさ感、摩擦感、温度感の4つがおもな情報といわれているが、本研究ではセンサのメカニズムから温度感以外の3種類の情報の測定を目的とする。よってそれぞれを別々に検出する基礎実験を行った。

##### 4.1 あらかさ感実験

センサを1.5mmの深さに押し込み、0.2mm, 0.4mm, 0.6mm波長の凹凸をつけたアクリル板の上をなぞる実験を行った。このときなぞり速度は20mm/sである。センサ内に配置したひずみゲージの出力の履歴を記録し、スペクトル解析を行い、周波数成分を導出した。Fig. 2に0.4mm波長の波形をなぞった際の実験結果を示す。50Hzの位置でパワースペクトルが極大値をとることがわかる。 $f$ を周波数、 $v$ をなぞり速度、 $\lambda$ を波長とすると、得られた結果は、

$$f = v / \lambda \quad (1)$$

を満たすため、対象表面のあらかさ検出が可能であると判断できる。押し込み量を変化させて同実験を繰り返したところ、同じように周波数を検出することができた。これはセンサの層構造によりならう現象が起きたためであると考えられる。

##### 4.2 やわらかさ感実験

従来手法では、やわらかさはヤング率やポアソン比を用いて表されてきた。しかし対象物の変形が測定できなければ正確な値を得ることはできない。それに対しヒトは対象物との接触面積からある程度やわらかさを判断することができる。そこで本研究ではセンサ内に配置した5つのひずみゲージの出力分布から接触面積を推定し、やわらかさを識別する実験を行った。ヤング率の異なる3種類のスポンジに押し込む動作を行い、分布を5つの値の分散から求めた。結果をTable 1に示す。実験結果とスポンジのヤング率を比較すると、本センサによりやわらかさの違いをひずみゲージの出力から求められることがわかる。

##### 4.3 摩擦感実験

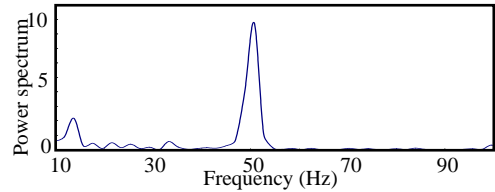


Fig. 2 Spectral analysis for the roughness experiment (wavelength 0.4mm)

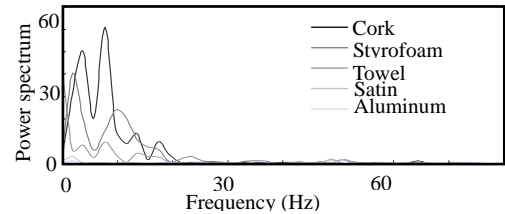


Fig. 3 Spectral analysis of different material

Table 2 Friction experiment results

	Before	1 <sup>st</sup> rinse	2 <sup>nd</sup> rinse	3 <sup>rd</sup> rinse	After
Tangential force (N)	1.68	0.28	2.59	3.082	2.15

Table 3 Tangential force generated with different material

	Cork	Styrofoam	Towel	Satin	Aluminum
Tangential force (N)	0.39	0.73	0.33	0.36	0.80

摩擦感とはつるつるな表面をなぞった際に感じるきゅっきゅとした感覚やひっかかり感を指すものとする。本研究では、セラミックタイルに油を塗布し、市販されている洗剤で油を洗い落とした際の触覚の変化を測定した。表面に油が残っている間表面はぬるぬるとし、摩擦感が小さいと考えられる。一方、油が洗い落とされた状態ではセンサとタイル表面の間に凝着が生じ、摩擦感が増大すると考えられる。センサに加わる接線力に着目すると、表面に残っている油が減少するほど接線力が大きくなっている(Table 2)。これより、摩擦感の変化を識別できたと考えられる。

#### 5. 実素材を用いた実験

6種類の触覚の異なる実素材、アルミニウム、コルク、サテン、デニム、タオル、発泡スチロールをなぞる実験を行った。Fig. 3およびTable 3にあらわされるとおり、センサ出力からあらかさ感、摩擦感の違いを検出できることがわかる。しかし、布の類は厚さが薄く、アルミ板に貼り付けた状態でなぞったため、満足にやわらかさ感の識別ができなかった。

#### 6. 結論

本研究では、ヒト指の構造および知覚機構を模倣した触覚センサの開発を行った。実験を通し、検出方法の有意性を確認するとともに、実素材への応用が可能であることを示した。

実験結果をさらに解析することによって触覚の違いを詳細に識別できると考えられる。

#### 文献

- (1) 白土寛和, 前野隆司, “「触る」ということ—ヒトとロボットの触覚—”, 表面, Vol. 41, No. 5, pp. 145-152, 2003
- (2) 前野隆司, 山田大介, 佐藤英成 “ヒト指紋形状の力学的意味” 日本機械学会論文集, Vol. 71, No. 201, C, pp245-250, 2005
- (3) 昆陽雅司, 赤沢和伸, 吉田晃典, 新宅加奈子, 才脇直樹, 田所論, “ICPF アクチュエータを用いた触覚ディスプレイの研究—第9報: 触運動に応じたテクスチャ感の提示方法—” 2004