

皮膚状マイクロ触覚センサによるテクスチャ計測に関する研究

東京大学大学院 情報理工学系研究科 知能機械情報学専攻

野田 堅太郎

In this paper, we propose a skin-type tactile sensor to measure a micro size texture of an object by scanning its surface. The sensor was composed of two layers with different stiffness, the surface layer with highly stiff and bumpy surface, and the inner layer with low stiffness.

The bumpy surface structure of the tactile sensor, like the finger prints, enables to detect the micro texture by scanning. According to this result, we designed and fabricated a tactile sensor and confirmed its sensing characteristics by scanning random texture patterns formed on a silicon wafer surface.

1. 緒言

コスメトロジーにおいて、髪や皮膚などの手触り感、その質感の良し悪しを判断する上で非常に重要な要素である。特に、髪の手触りには、髪表面に存在するキューティクルの存在が大きく関与しており、その形状・分布を計測し、これを定量的に評価する手法が必要となる。

髪表面には、一辺 $50\mu\text{m}$ 、厚み $1\mu\text{m}$ 程度の大きさ¹⁾の鱗形状をしたキューティクルが積み重なって存在している(図1)。人は、物体表面のマイクロサイズのざらつきを判別が可能である²⁾ことから、髪を梳いた際に感じるキューティクル状態の差を髪質の差として鋭敏に感知できると考えられる。

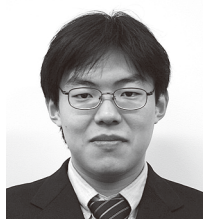
このように髪質を評価する上で重要となるキューティクルの形状、状態を計測する方法として、これまで物体表面をなぞった際に生じる振動を計測するセンサ³⁾などが実現されている。しかし、これまで提案されているセンサの表面構造は平坦なものが多く、キューティクルのように微小な大きさのテクスチャを計測することは困難であった。

そこで本研究では、高感度にテクスチャを計測することができる人の皮膚構造に注目し、指紋構造を模した触覚センサを実現した。このとき、指紋構造の形状と触覚センサ感度とを比較することで、微小なテクスチャの計測に必要な指紋構造の形状の設計方法の確立を目指す。

2. 微小テクスチャを計測するための皮膚状構造体の特性評価

2.1 皮膚状構造体の設計・試作

提案する皮膚状構造を持つ触覚センサの概念図を図2に



Texture detection with micro skin type tactile sensor

Kentaro Noda

Department of Mechano-Informatics,
Graduate School of Information Science
and Technology, The University of Tokyo

示す。人の皮膚は図2Aに示すように、剛性が高く、指紋状構造が存在する表皮内に剛性が低い組織が包まれている(真皮)。この表皮と真皮との境にメルケル触盤やマイスナー小体といった触覚受容体が多く存在しており、表皮の変形を計測している²⁾。

そこで、図2Bに示すように、提案する触覚センサは、表皮に当たる剛性が高く指紋のような凹凸構造が存在するシリコンゴム層と、真皮に当たる剛性の低いシリコンゴム層を重ね合わせた。また、剛性が低いシリコンゴム層部分にセンサ素子を配置し、センサ表面部分の変形を検出する^{4,5)}。

センサ素子には、直立状に配置したピエゾ抵抗素子^{6,7)}を利用した。ピエゾ抵抗素子は、変形することで抵抗値が大きく変わる材料である。これを直立状に配置することで、図2Cの矢印方向の変形を抵抗値変化として検出可能である。このピエゾ抵抗素子を皮膚状構造中に配置することによって、物体表面をなぞった際に触覚センサに生じるせん断変形を計測する(図3)。

物体表面をなぞった際に生じるせん断変形は、皮膚状構造表面の指紋構造が物体表面のテクスチャと触れることで生じると考えられるため、物体表面をなぞった際の触覚セ

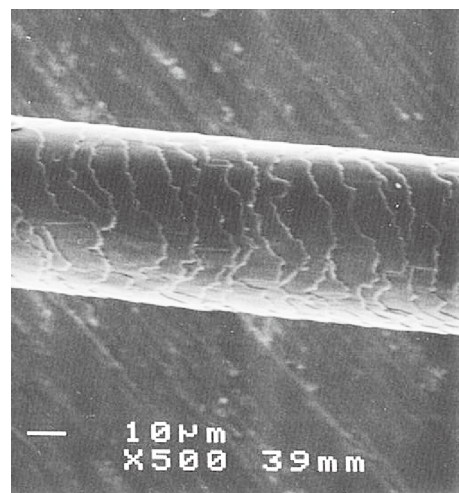


図1 毛髪表面のSEM観察画像

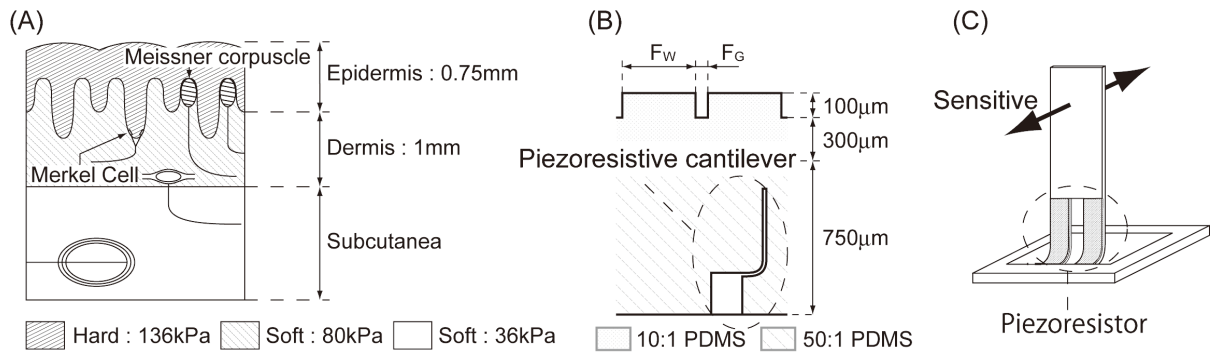


図2 提案する触覚センサの概念図

(A) 皮膚の断面図、(B) 提案する触覚センサの断面図、(C) ピエゾ抵抗カンチレバーの構造

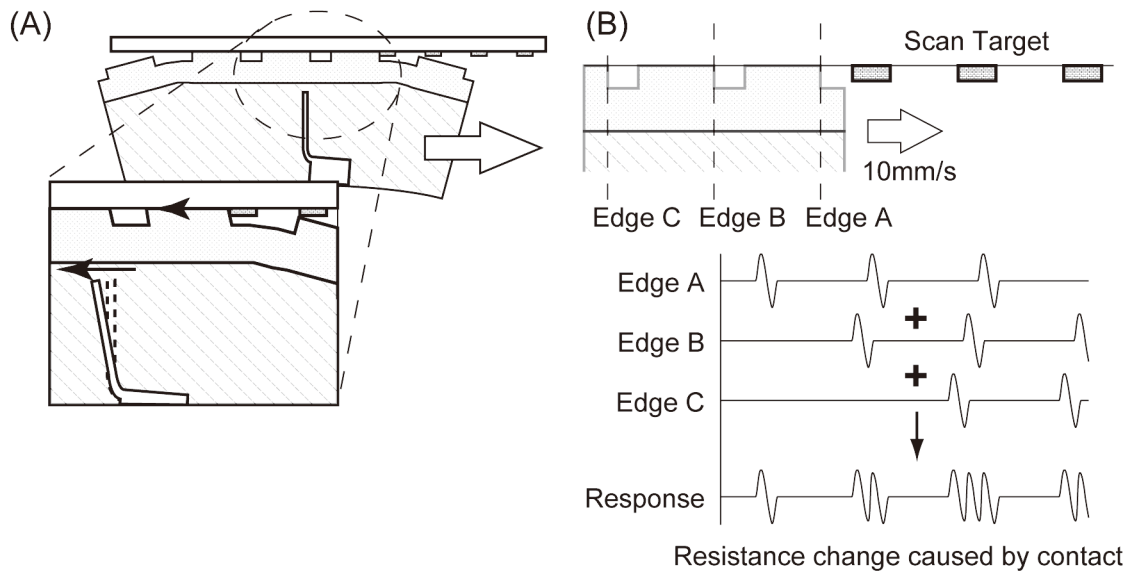


図3 なぞりによる物体表面テクスチャの計測

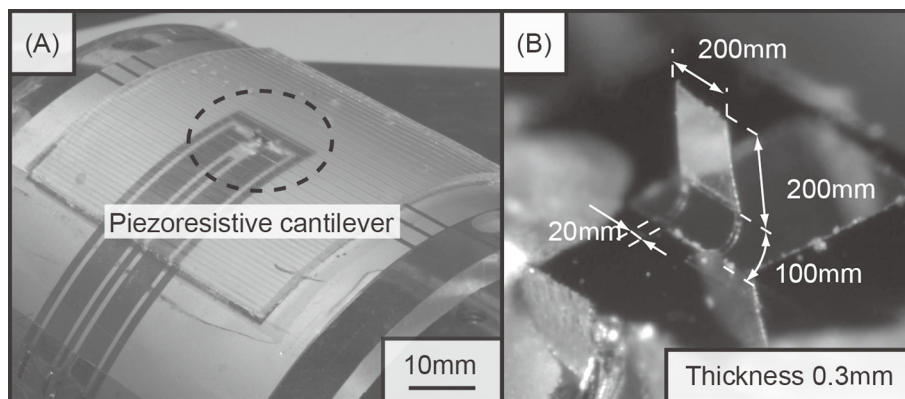


図4 試作した皮膚状触覚センサ

(A) 全体図、(B) 内部に配置したピエゾ抵抗カンチレバー

ンサの出力は、センサ表面の指紋構造の形状によって変化すると予測される。そこで、本研究では触覚センサ表面の指紋構造の形状、すなわち図2Bにおける幅 FW を $0.025\text{mm} \sim 0.6\text{mm}$ 、指紋間のギャップ FG の値を $0.15\text{mm} \sim 3.0\text{mm}$ まで変化させた場合の指紋状構造の形状とセンサの感度との関係を計測する。

試作した皮膚状構造を持つ触覚センサおよびピエゾ抵抗素子の写真を図4に示す。この触覚センサは、 $30 \times 30\text{mm}^2$ の大きさであり、配線にフレキシブルなポリイミド-銅基板を用いることによって、曲面に固定することを可能とした。

2.2 なぞり動作による物体表面形状の計測

物体表面を走査するにあたり、図5に示すようなセットアップを作成した。このセットアップでは、一軸方向自動ステージの上に6軸力計および半径30mmの半円柱を配置し、半円柱表面に触覚センサを配置した。6軸力計の出力を元に、触覚センサと計測対象物との接触力を決定し、自動ステージを駆動させることで、一定の押し付け力で物体表面をなぞることが可能である。

本研究では、人が物体表面をなぞる動作を模して、押し付け力を0.2N、なぞり速度を10mm/sとして計測を行った。

2.3 触覚センサ表面の指紋構造の有効性の検証

本研究が提案する皮膚状構造の有効性を検証するため、試作した皮膚状触覚センサと表面に指紋状構造がない平坦な触覚センサを利用し、幅0.1mm、ギャップ0.3mmの凹凸構造を走査し、応答結果の差を比較、検証した(図6、7)。

図7の各センサでの計測結果をフーリエ変換し、周波数特性を算出、比較した結果を図8に示す。本実験で計測した凹凸構造のエッジからエッジまでの距離は0.4mm、な

ぞり速度が10mm/sであることから、図8では、25Hzの位置に応答のピークを観測した。二つのセンサにおいて、このピーク値の大きさを比較すると、センサ表面に指紋構造を持つことで、センサの出力が約50倍まで上昇していることが確認された。この結果から、本研究が提案するように、触覚センサ表面に指紋構造を形成した皮膚状触覚センサを用いることで、センサの感度が向上し、微小な凹凸の計測に有効であることが確認された。

2.4 指紋構造幅 FW がセンサ感度に与える影響の検証

指紋構造の形状と触覚センサの感度との関係を求めるため、まず図2における指紋構造の幅 FW を0.025mm～0.6mmまで変え、図6Cと同様の凹凸形状をなぞった際のセンサ応答の周波数特性を計測した。ただし、指紋構造間の距離 $FG=0.45$ mmで一定とした。結果3.1と同様に、各センサにおいて、周波数25Hzでのセンサ出力を比較した結果を図9に示す。

図9の結果が示すように、指紋構造の幅 FW が0.6mmから細くなるにつれ、応答が増加していき、 $FW=0.05$ mmの

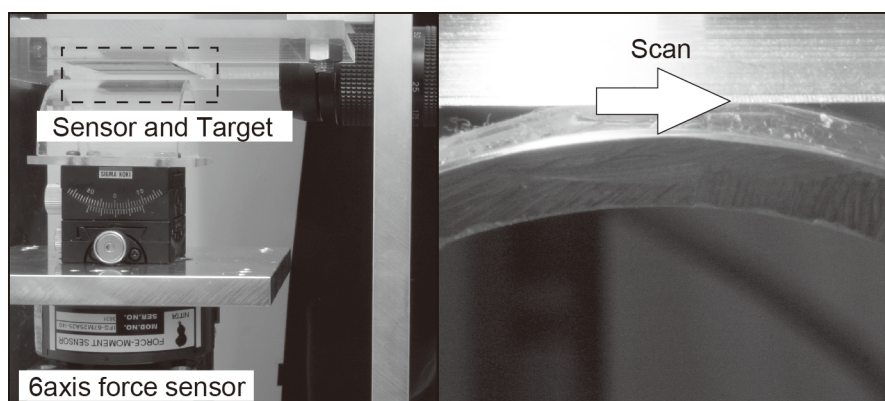


図5 触覚センサを用いた物体表面のなぞり計測用セットアップ

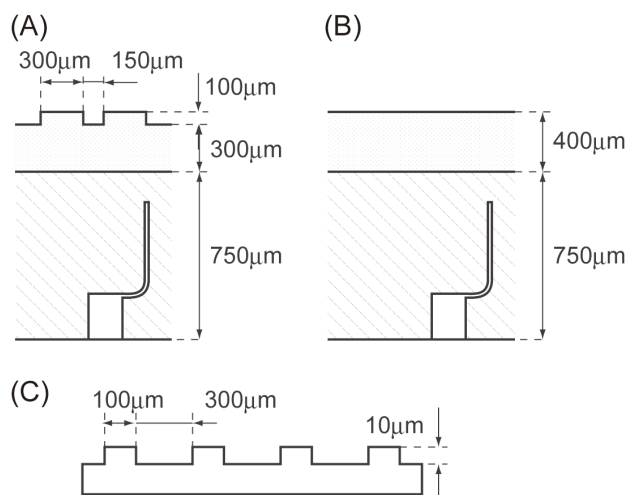


図6 指紋構造の有効性を検証するための触覚センサの寸法値 (A) 皮膚状触覚センサ、(B) 表面が平坦な触覚センサ、(C) 計測対象の寸法

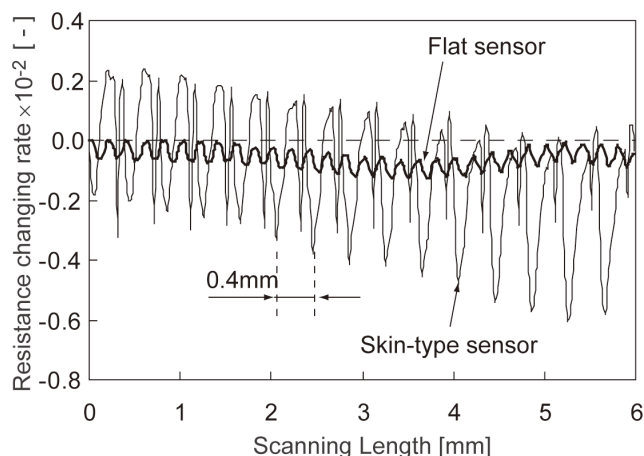


図7 皮膚状触覚センサと表面が平坦な触覚センサを用いた物体表面のテクスチャ計測結果の比較

ときに感度が最大になった後、更に幅が狭くなり $FW=0.025\text{mm}$ になると出力が減少していくことがわかる。

指紋構造の幅が 0.6mm よりも細くなっていった場合、指紋構造と指紋構造との間に物体表面の凹凸形状が入り込みやすくなるために触覚センサの出力が増加する。しかし、指紋構造のアスペクト（指紋構造の幅/指紋構造の高さ）が大きくなり、細くなりすぎた場合、指紋状構造が物体表面の凹凸形状と接触した際に生じる接触力によって折れ曲がり、触覚センサ内部にまで変形が届かなくなるものと予想される（図10）。こうした原因により、提案した触覚センサでは、指紋状構造の高さ $100\mu\text{m}$ に対して、幅 $50\mu\text{m}$ の構造が最も高い感度を持つことになったと考えられる。

2.5 指紋構造間ギャップ FG がセンサ感度に与える影響の検証

2.4と同様に指紋構造間のギャップ FG を $0.15\text{mm} \sim 3.0\text{mm}$ まで変化させた場合のセンサ出力の変化を計測した。このとき、指紋構造の幅 $FW=0.3\text{mm}$ で一定とした。また、計測対象としては図6Cに示したものを使用した。

対象物表面をなぞった際の応答周波数 25Hz でのセンサ出力と FG との関係性をまとめた結果を図11に示す。この結

果が示すように、 FG が $0.15\text{mm} \sim 1.0\text{mm}$ の間では増加していくものの、 1.0mm を超えるとセンサの出力が減少していくことが分かる。

本実験の結果は、2.4節の結果と同様に、指紋構造間のギャップ FG が狭くなることによって、指紋構造間に物体表面の凹凸が入り込むことが難しくなるために $FG=0.15\text{mm} \sim 1.0\text{mm}$ の間では、 FG の減少に従ってセンサ応答が減少していると考えられる。一方、 $FG=3.0\text{mm}$ の場合にセンサ応答が減少する原因としては、指紋構造間の間隔が開いたことで、各指紋構造と物体表面の凹凸との間で生じた変形の重畳が起こらなくなったことが原因と考えられる。図3Aに示したように、本触覚センサでは、指紋構造と物体表面に存在する凹凸が接触したことによって、せん断変形が生じている。触覚センサ表面には複数の指紋構造が存在するため、触覚センサに生じるせん断変形は、指紋構造一つ一つで生じたせん断変形の重ね合わせとなる（図3B）。このため、指紋構造間のギャップ FG が大きくなりすぎると、変形の重畳が生じなくなり、なぞりによって起こる触覚センサの出力が減少したと予想される。こうした原因により、指紋構造間のギャップと触覚センサの出力

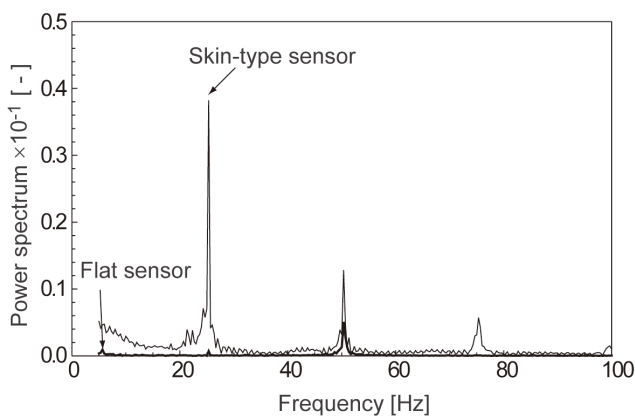


図8 物体表面をなぞった際のセンサ応答の周波数特性比較

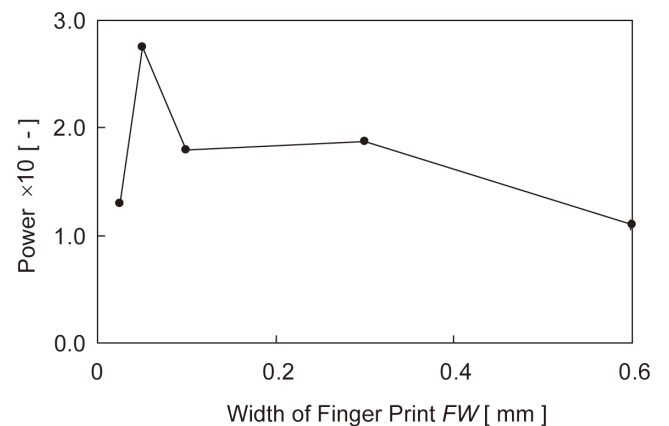


図9 指紋構造幅 FW とセンサ出力の関係

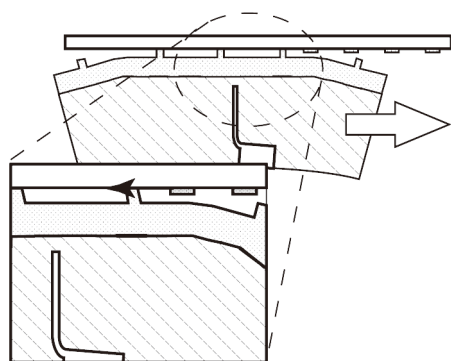


図10 高アスペクト指紋構造にて物体表面をなぞった場合の変形模式図

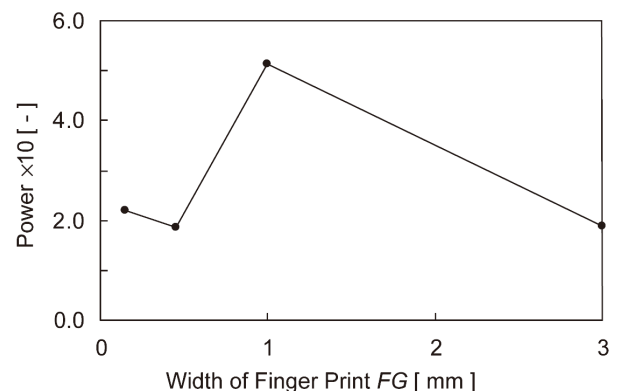


図11 指紋構造間のギャップ FG とセンサ出力の関係

との関係を考慮した場合、 $FG=1.0\text{ mm}$ にてセンサ出力が最大になったと考えられる。

2.6 皮膚状構造体の設計手法に関する考察

3節における実験結果より、本研究において提案する触覚センサでは、表面の指紋構造の幅、構造間のギャップによって感度が大きく変化する。こうしたセンサ感度を最大とする寸法値は、3節でも述べたとおり、例えば指紋幅に関しては、指紋の高さと指紋幅との関係であるアスペクト比や、触覚センサ表面を構成する材料の剛性などが影響することが予想される。特に材料の剛性などを変えた場合、触覚センサの感度の最適値が変化する可能性が考慮されるものの、指紋幅 $FW=0.05\text{ mm}$ 、指紋構造間の距離 $FG=1.0\text{ mm}$ とすることでセンサの感度が最大になるという結果を得た。

3. ランダム配置した微小凹凸構造の計測試験

3.1 計測対象物の設計および実験手法

幅 0.1 mm 、高さ 0.01 mm の凸構造をシリコン基板上に連続的に作製し、その表面を試作した触覚センサでなぞることで、凸構造の間隔・周期をセンサ出力から検出可能であるかを確認した。

このとき、計測を行うに当たり、人の指紋構造と同等の寸法である、 $FW=0.3\text{ mm}$ 、 $FG=0.15\text{ mm}$ の皮膚状構造体を持つ触覚センサを使用した。また、触覚センサに液体フィルタを組み込むことで、なぞり時の摩擦力がセンサ出力に与える影響を軽減している。

使用したサンプルでは凸構造を61個配置しており、各凸構造間の間隔は 0.1 mm 、 0.3 mm 、 0.6 mm の間隔をラン



図12 ランダム配置した凸構造サンプル
(A) 試作したサンプルのイメージ (B) 配置周期とその割合

ダムに選択・作製している。作製したパターンを図12に示す。また、本実験では、ランダムサンプルの凸構造の配置間隔の選択回数は図12に示すとおりである。

物体表面をなぞるにあたり、接触力は 0.2 N 、なぞり速度は 15 mm/s とした。

3.2 触覚センサによる計測結果の評価

試作したランダムサンプル表面を触覚センサによってなぞった結果を2.4. および2.5. 章の場合と同様に、センサ出力を周波数解析した結果と凸構造の配置パターンから周波数を算出した結果の比較を図13に示す。

図13が示すように試作したランダムサンプルの凸構造の配置周期と同様に、サンプルをなぞった際の周波数解析結果では、 0.1 mm 、 0.3 mm 、 0.6 mm 間隔で配置した凸構造をなぞった時に生じる周波数成分である、 75 Hz 、 37.5 Hz 、 25 Hz の周波数応答が検出されることを確認した。

この結果は、対象がランダムに配置されたパターンであっても、配置された凸構造の周期をセンサ出力の周波数解析結果から検出できることを示しており、提案した皮膚状構造を有する触覚センサを用いることで、一般的な物体表面の凹凸周期を計測できることを確認した。

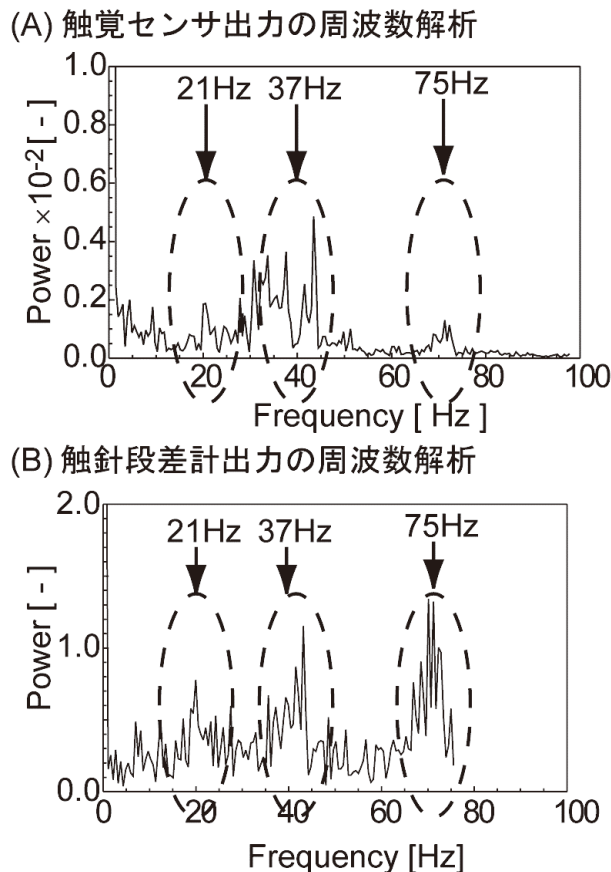


図13 ランダムサンプルをなぞった際の周波数解析結果
(A) 触覚センサ出力 (B) 触針段差計出力

4. 総 括

本研究の成果として、人の皮膚表面の構造が微小なテクスチャ計測を行う上で重要であることを確認するとともに、テクスチャ計測に有効な触覚センサ表面の指紋状構造の形状の設計方針を確立した。またランダムに配置した凸構造サンプル表面を触覚センサによってなぞった際に、センサ出力の周波数応答から、凸構造の配置周期を検出できることを確認し、提案するセンサが物体表面の微小凹凸-テクスチャの周期を検出する上で有効であることを確認した。

本成果を元に試作した皮膚状構造を持つ触覚センサは、毛髪表面に存在するキューティクルのようにマイクロサイズのテクスチャを計測することが可能となり、髪質のような触感情報の定量的な計測・評価につながると期待される。

(引用文献)

- 1) C. Popescu, and H. Höcker, "Cytomechanics of Hair: Basics of the Mechanical Stability," *International Review of Cell and Molecular Biology*, vol.277, pp.137-156, 2009.
- 2) 山鳥重, 彦坂興秀, 河村満, "タッチ," 医学書院, 2001.
- 3) 針生誠, 田中真美, 柿澤みのり, 川副智行, 清水秀樹, "毛髪手触り感計測用センサの開発に関する研究," *日本機械学会情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集*, pp.69-73, 2008.
- 4) K. Noda, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "Tactile sensor with standing piezoresistive cantilevers, covered with 2-layer skin type structures for texture detection of object surface," *Proc. of IROS2008*, 2008.
- 5) K. Noda, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "Skin-type tactile sensor using standing piezoresistive cantilever for micro structure detection," *Proc. of IEEE Sensors*, 2010.
- 6) K. Noda, K. Hoshino, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "A shear stress sensor for tactile sensing with the piezoresistive cantilever standing in elastic material," *Sensors and Actuators A*, vol.127, pp.295-301, 2006.
- 7) 野田堅太郎, 高橋英俊, 中井亮仁, 松本潔, 下山勲, "ピエゾ抵抗カンチレバーを用いたMEMS力センサに関する研究," *4大学ナノ・マイクロファブリケーションコンソーシアム*, 2011.