

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号： 22604  
研究種目： 国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））  
研究期間： 2019～2023  
課題番号： 18KK0313  
研究課題名（和文）表面テクスチャの力学・統計モデルと二元触感提示装置を用いた質感認知機構の解明  
  
研究課題名（英文）Elucidation of tactile texture recognition system of humans using two-dimensional tactile texture display and physical-stochastic model of surface textures  
  
研究代表者  
岡本 正吾（OKAMOTO, SHOGO）  
  
東京都立大学・システムデザイン研究科・教授  
  
研究者番号：10579064  
  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,600,000円  
渡航期間： 1ヶ月

研究成果の概要（和文）：米国カリフォルニア大学サンタバーバラ校のYon Visell氏の研究チームに在籍し、共同研究を実施する予定であったが、コロナ禍と研究代表者の異動が重なり、渡航は断念した。研究経費は、95,108円を使用した。このほとんどはvisa取得のための費用である。本報告書の渡航期間を0か月とすることをシステムが受け付けないため、1か月としているが、実際には渡航していない。  
日本国内で可能な限り、当初の研究計画を遂行することに努めた。本研究の最大の肝は、現在の主要な2つのテクスチャ提示手法である1)物理モデル型と2)統計モデル型を統合する点にあり、その具体的手法の提案と実装と効果検証を実施した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の目的は、触覚テクスチャディスプレイの高度化である。ここで、高度化とはよりリアリズムが高いテクスチャ提示を可能とするという意味である。本研究は、商用化の可能性は度外視した2次元触感テクスチャディスプレイというハイスpek装置を用いて、テクスチャ提示の最高性能を目指した。この装置を用いた具体的なテクスチャ提示手法を開発し、その効果を実証しえたことは、ハプティクス分野の頂点を広げたという点で意義が深い。成果はやがて、スマートフォンのタッチパネルなどのための触覚提示機能として還元されると信じている。

研究成果の概要（英文）：The principal investigator was scheduled to be affiliated with the research team led by Prof. Yon Visell at the University of California, Santa Barbara, and conduct joint researches. However, due to the COVID-19 pandemic and the transfer of the principal investigator, I abandoned the plan to travel. The research expenses amounted to 95,108 yen, most of which were costs related to obtaining a visa. Since the system does not accept a travel period of zero months in this report, it is stated as one month, but in reality, no travel took place.  
The principal investigator attempted to carry out the initial research plan as much as possible in Japan. The core of this research lies in integrating the two main current texture presentation methods: 1) the physical model type and 2) the statistical model type. For this integration, specific methods were developed, implemented, and their effectiveness was verified through user studies.

研究分野： ハプティクス

キーワード： 触感 摩擦 振動触覚刺激 触感ディスプレイ 統計モデル 物理モデル

### 1. 研究開始当初の背景

タッチパネルが主流となったポータブル・ユーザ・インターフェースにおいて、触覚フィードバック技術の需要が高まっている。触覚ディスプレイ技術は、主に振動触覚型と摩擦変動型の2種類に分類される。振動触覚ディスプレイは、パネルが機械的に微小かつ高速に駆動され、指先が変形することで触覚を引き起こす。摩擦型触覚ディスプレイは、パネル上を指が滑る際に摩擦力を増減させることで、仮想表面の摩擦分布を制御する。

本研究では、振動触覚刺激と静電摩擦刺激の組み合わせが、仮想的な触覚テクスチャのリアリズムを向上させるかどうか、またその他の行動指標を向上させるかを調査した。振動触覚刺激は表面の粗さを提示するのに適しており、摩擦刺激は空間的な摩擦分布や摩擦振動を提示するのに適している。これらの刺激を同時に使用することで、仮想的な触覚テクスチャの品質が向上することが期待される。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、振動触覚刺激と静電摩擦刺激の組み合わせが、触覚テクスチャの提示において主観的なリアリズムおよびその他の応答に及ぼす影響を評価することである。具体的には、以下の三つの観点から評価を行うことである：

- ・ 主観的リアリズム：振動触覚刺激、静電摩擦刺激、およびこれらの結合刺激が、実際の粗さテクスチャとの類似性に基づいてどの程度のリアリズムを供するかを評価する。
- ・ テクスチャ認識：異なる粗さのテクスチャを認識もしくは弁別する能力を、各刺激条件（振動触覚刺激のみ、静電摩擦刺激のみ、およびこれらの併用刺激）で評価する。
- ・ 空間波長の識別閾値：各刺激条件でのグレーティング・スケールの空間波長の弁別閾値を比較する。これは、テクスチャのより細かな空間特徴を識別する能力の調査である。

### 3. 研究の方法

実験は3部に分かれる。いずれの実験でも、図1の触覚ディスプレイを用いた。装置は、振動触覚刺激と静電摩擦刺激を同時に提示可能であり、類似の装置は他になく、研究開始時点では世界で唯一のものであった。

- ・ 主観的リアリズムの比較（実験1）：単一の正弦波で構成される単純なグレーティング・ス

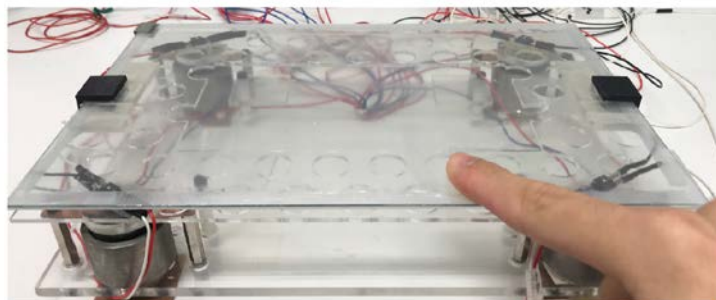


図1. 実験で用いた触覚ディスプレイ。振動触覚刺激と、静電摩擦刺激を同時に提示する。4隅にロードセルが配置されており、パネル上での指の位置を計測する。透明なパネルは、ITO電極が塗布されたガラスである。

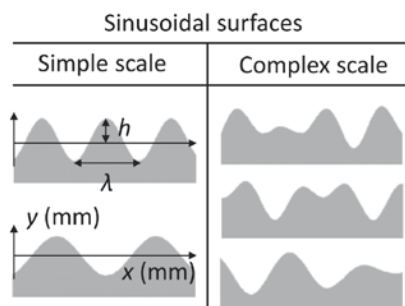


図2. 仮想テクスチャの形状。左が、単一の正弦波で構成される表面。右が、2つの正弦波の合成で構成される表面。合計で、5種類の仮想テクスチャを試験した。

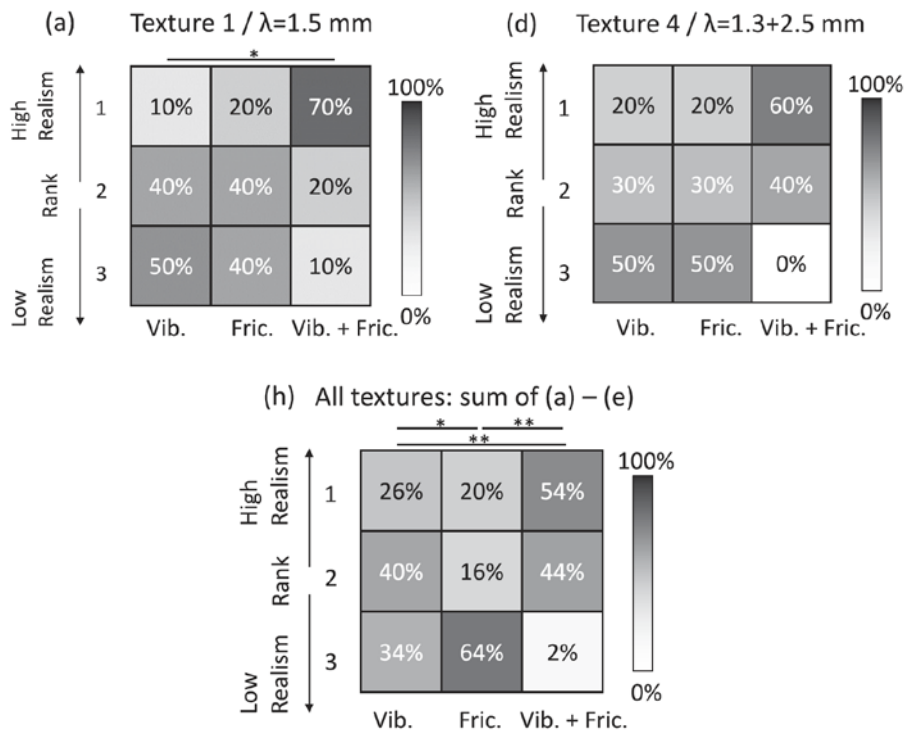


図 3. 実験 1 の結果 (抜粋). (a) 波長が 1.5 mm の仮想グレーティング・スケールについて, Vib. + Fric. (混合条件) が 3 つの条件の中でもっともリアリズムが高いと回答した人が全体の 70% であった. Vib. と Fric. はそれぞれ, 振動触刺激条件と静電摩擦刺激条件を示す. (c) 2 つの正弦波を組み合わせて構成される複雑な表面形状の場合. (h) 5 種類の仮想グレーティング・スケールの結果の平均. Vib. + Fric. 条件は, Vib. 条件及び Fric. 条件よりも, テクスチャのリアリズムが有意に高いと評価された.

ケールと 2 つの正弦波を組み合わせて作成した表面形状 (図 2) を使用して, 振動触覚刺激, 静電摩擦刺激, およびこれらの併用刺激を比較した. 参加者は, 仮想的な粗さテクスチャが実際のテクスチャにどれだけ類似しているかについて, 3 刺激条件を順位付けした.

- ・ テクスチャ認識の評価 (実験 2): 異なる 5 種類の粗さテクスチャ (グレーティング・スケール) を使用して, 各刺激条件でのテクスチャの認識精度を評価した. 実験参加者は, 仮想的な刺激が実際の粗さテクスチャのどれに対応しているかを, 各刺激条件下で判断した. それぞれのテクスチャは, 各刺激条件下で, 10 回ずつ繰り返し提示された.
  - ・ 空間波長の識別閾値の比較 (実験 3): 正弦波の粗さ刺激を使用し, 各刺激条件での空間波長の弁別閾値を調査した. 標準刺激として, 実験 1 で使用した粗さテクスチャを使用した.
- 以上の実験は, 10 名の参加者を対象として行われた. いずれの参加者も, 実験内容に同意のうえで, 自由意思に基づいて実験に参加した.

#### 4. 研究成果

##### 主観的リアリズム (実験 1)

振動触覚刺激と静電摩擦刺激の併用条件は, 単純および複雑な正弦波の粗さテクスチャのリアリズムを向上させることが示された. 結果を図 3 に示す. 5 種類のテクスチャの平均について, 併用条件が有意に最もリアリズムが高いと評価された. 次に, 機械的振動刺激条件が優れていた. この結果は, われわれの先の研究 (Ito et al., ACM Trans. Applied Perception, 2019) とも附合する.

##### テクスチャ認識 (実験 2)

併用刺激によるテクスチャ認識性能は, 振動触覚刺激のみの場合や静電摩擦刺激のみの場合と比較して若干向上したが, その効果は限定的であった. 実際の粗さテクスチャに対する認識精度は 83% であり, 併用条件 (46%) を大きく上回った.

##### 空間波長の弁別閾値 (実験 3)

併用刺激は, 空間波長の弁別閾値を低下させることが期待されたが, 刺激条件間で明確な差異は見られなかった. 波長が 1.5 mm のテクスチャに対する弁別閾は, およそ 0.4 mm であり, わずかに静電摩擦刺激条件が, 併用条件よりも劣った. 波長が 2.5 mm のテクスチャに対する弁別閾は, およそ 0.4-0.5 mm であり, 静電摩擦刺激条件が, 他の 2 条件よりも劣った.

結論として, 振動触覚刺激と静電摩擦刺激の組み合わせは, 主観的なリアリズムを向上させた. ただし, 行動指標に対する効果は限定的であった. 現在, 主流である機械的振動と静電摩擦刺激を組み合わせることによって, それらをリアリズムの観点から凌駕する触覚テクスチャ・ディスプレイが実現することが実証された. 本報告書のより詳細な内容は, 下記にて確認できる.

Kazuya Otake, Shogo Okamoto, Yasuhiro Akiyama, and Yoji Yamada, Tactile texture display combining vibrotactile and electrostatic-friction stimuli: Substantial effects on realism and moderate effects on behavioral responses, *ACM Transactions on Applied Perception*, vol. 19, issue 4, article no. 18, 2022. DOI: 10.1145/3539733

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hasegawa Hikaru, Okamoto Shogo, Yamada Yoji	4. 巻 13
2. 論文標題 Phase Difference Between Normal and Shear Forces During Tactile Exploration Represents Textural Features	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Haptics	6. 最初と最後の頁 11~17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TOH.2019.2960021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Okamoto Shogo, Oishi Ariei	4. 巻 13
2. 論文標題 Relationship Between Spatial Variations in Static Skin Deformation and Perceived Roughness of Macroscopic Surfaces	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Haptics	6. 最初と最後の頁 66~72
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TOH.2020.2964538	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Otake Kazuya, Okamoto Shogo, Akiyama Yasuhiro, Yamada Yoji	4. 巻 15
2. 論文標題 Tactile Texture Rendering for Electrostatic Friction Displays: Incorporation of Low-Frequency Friction Model and High-Frequency Textural Model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Haptics	6. 最初と最後の頁 68~73
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TOH.2021.3138647	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Otake Kazuya, Okamoto Shogo, Akiyama Yasuhiro, Yamada Yoji	4. 巻 19
2. 論文標題 Tactile Texture Display Combining Vibrotactile and Electrostatic-friction Stimuli: Substantial Effects on Realism and Moderate Effects on Behavioral Responses	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACM Transactions on Applied Perception	6. 最初と最後の頁 1~18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3539733	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hasegawa Hikaru, Okamoto Shogo, Yamada Yoji	4. 巻 13
2. 論文標題 Phase Difference Between Normal and Shear Forces During Tactile Exploration Represents Textural Features	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Haptics	6. 最初と最後の頁 11~17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TOH.2019.2960021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東京都立大学 人間情報学研究チームのホームページ  <a href="https://www.comp.sd.tmu.ac.jp/hci/">https://www.comp.sd.tmu.ac.jp/hci/</a></p>
--

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------