

令和 6 年 5 月 21 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H04263

研究課題名（和文）多次元触感ディスプレイでせまる素材触知覚の恒常性原理

研究課題名（英文）Study on constancy of tactile texture perception by using multi-dimensional tactile texture display

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） 11,910,000円

研究成果の概要（和文）：テクスチャは一般に摩擦と表面粗さで定義されるが、われわれの研究の特徴は、静電摩擦刺激と機械振動刺激を併せて提示可能な2次元触感ディスプレイを用いて、リアリズムの高い触感提示を実現する点にある。

目標の1つ目は、2次元触感提示ディスプレイが、従前の摩擦か機械振動刺激のみを提示するディスプレイよりも優れていることを示すことであり、摩擦刺激と振動刺激の混合が適していることを、参加者実験により示した。

目標の2つ目は、現在もしくは研究開始時点で主要なテクスチャ生成アルゴリズムである1)物理モデル型と2)統計モデル型を統合することであり、統合モデルは、物理モデル型よりも優れた触感を提示しえた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

タッチパネルは現在の情報機器にとって、もっとも標準的なヒューマン・インタフェースである。われわれの研究は、ここに触覚刺激提示機能を付加するものであり、より直感的で楽しいインタフェースの実現につながることで、多くの研究によって実証されている。本研究は、テクスチャ提示に焦点を絞り、その最高峰の提示装置と刺激生成手法の開発を同時に推し進めるものであり、ここで確立された技術は、やがて普及する技術の礎となる。

研究成果の概要（英文）：Texture is generally defined by friction and surface roughness. The distinguishing feature of our research is the realization of highly realistic haptic feedback using a two-dimensional tactile display that can present both electrostatic friction stimuli and mechanical vibration stimuli.

The first goal is to demonstrate that the two-dimensional haptic display is superior to conventional displays that present only friction or mechanical vibration stimuli. We showed, through participant experiments, that the combination of friction and vibration stimuli is more appropriate.

The second goal is to integrate the two main texture generation algorithms at the time of our research or its commencement: 1) physical model type and 2) statistical model type. The integrated model provided a superior haptic experience compared to the physical model type.

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

### 1. 研究開始当初の背景

表面触感テクスチャ・ディスプレイは、タッチパネルのための触感提示装置であり、タッチパネルが主要なヒューマン・インタフェースとなっている現在において、ハードウェアとソフトウェアの開発競争が盛んになっている。本研究は、この装置を用いて、如何にリアリズムの高いテクスチャ（表面の触り心地）を提示するかということを課題とする。研究開始当時（現在も）に、主要なテクスチャ提示手法は、2つに分別できる：1）物理モデル型、2）統計モデル型。物理モデル型は、提示しようとする表面の物理特徴（表面粗さ、摩擦、凹凸形状）に基づいて、それを指で擦ったときに生じるであろう、摩擦および機械的振動を計算し、触感ディスプレイで提示する。統計モデル型は、提示しようとする表面を擦ったときに生じる機械刺激（摩擦・振動）の統計情報（典型的には、周波数スペクトラム）を、触感ディスプレイで再現しようとするアプローチである。データ駆動型モデルとも呼ばれる。前者は、物理的に整合した刺激の生成を目指し、後者は、テクスチャ知覚にヒトが用いる統計情報の再現を目指す。これらの刺激生成手法の高度化と、これらを超越した手法の開発が望まれている。

### 2. 研究の目的

タッチパネルのための触感ディスプレイを用いて、リアリズムが高いテクスチャ提示を実現する。そのために適したテクスチャ提示手法を開発し、効果を検証する。具体的には、テクスチャ生成モデルとして、物理モデル型と統計モデル型を併用した新しいテクスチャ生成手法を開発する。

### 3. 研究の方法

タッチパネル型触感提示装置を用いて、パネル上の摩擦分布を制御する装置を触感ディスプレイとして利用した。この装置は、図1のように、指とパネルの間に電解を掛け、両者の間に働く静電吸引力を制御する。パネル上での指の運動は、計測されており、指の運動に応じて刺激が生成される。

テクスチャ刺激生成手法として、物理モデル型と統計モデル型を併用した。物理モデル型では、テクスチャ面を指が擦るときの、動摩擦をモデル化した。このモデルは、凝着摩擦と変形摩擦の荷重依存性及び、速度依存性を表現した。モデルパラメータは、計測実験の結果をもとに決定した。計測装置は、2分力計測装置と呼び、素材を指で擦っているときの指の運動と、せん断力及び法戦力を精緻に、水晶型力センサを用いて計測することができる (Hasegawa et al., IEEE Trans. Haptics, 2020)。この物理モデルは、テクスチャ刺激の低周波領域のモデル化に相当する。一方で、統計モデルは、テクスチャを擦るときに発生する摩擦の周波数スペクトラムを再現した。ホワイトノイズ源からの信号を、素材（デニム・皮革・コルク・木材）から観察された周波数スペクトラムを用いて成形した。成形された摩擦刺激は、おおよそ各素材が生成した周波数スペクトラムの振幅特性に類似する。このうち、3.5 Hz以上の周波成分のみを統計モデルからの信号として用いた。

物理モデルと統計モデルの併用手法の効果を、物理モデル単体で生成された仮想テクスチャ刺激と比較した。比較実験では、4種類の素材の仮想テクスチャのリアリズムを、本物の素材と比較することで評価した。実験参加者は、大学生14名であった。

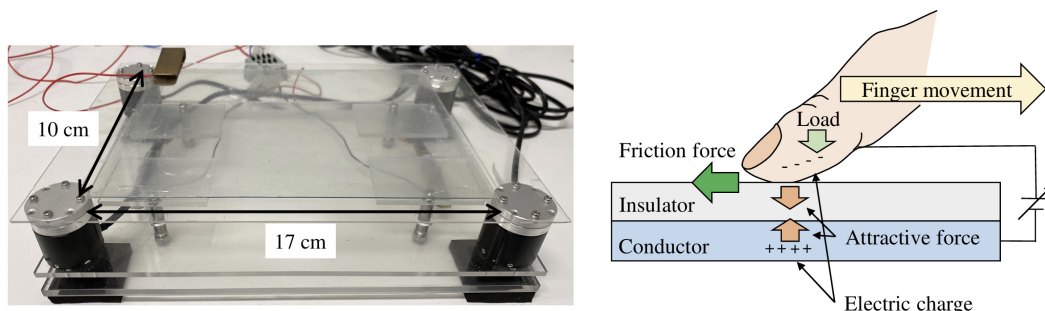


図1. 静電摩擦を提示可能な触感ディスプレイ。左) 装置写真。透明電極が塗布されたガラス面をタッチパネルとみたと、摩擦刺激を提示。4隅の力センサは、指の運動及び荷重を計測。右) 原理図。指腹とパネルに静電気が蓄えられ、吸引力が働く。吸引力が摩擦力に影響し、高速に制御できる。指とパネルの間に絶縁体があるため、電流が指に流れるわけではない。

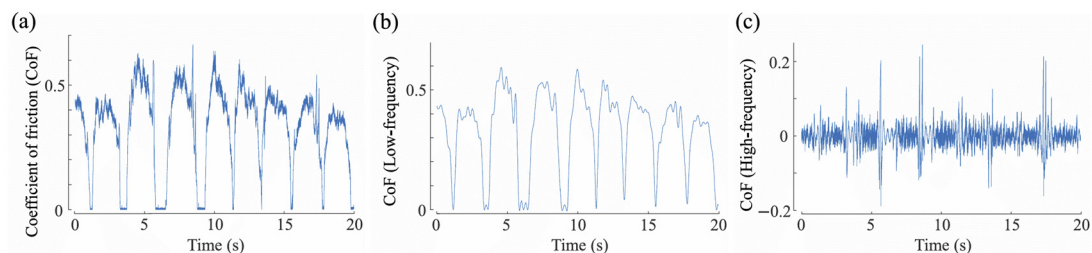


図 2. デニムを擦ったときに観察された摩擦係数の時系列データ. (a) 生データ. 摩擦係数は, せん断力と法線荷重の比で定義. (b) 3.5 Hz 以下の低周波成分で, 物理モデルのパラメータ決定に利用した. (c) 3.5 Hz 以上の周波数成分. 摩擦係数の周波数特性を決定するために用いた.

表 1. 仮想テクスチャの弁別実験の結果としての混同行列. 対角成分が, 正答率に相当する. (a) 物理モデルと統計モデルの併用手法でテクスチャ刺激を生成した場合の結果. (b) 物理モデルのみでテクスチャ刺激を生成した場合の結果.

(a) Friction model + textural model

		Virtual materials			
		Leather	Cork	Denim	Wood
Actual materials	Leather	.71 ± .16	.00 ± .00	.18 ± .16	.11 ± .11
	Cork	.07 ± .09	.75 ± .16	.11 ± .11	.00 ± .00
	Denim	.14 ± .12	.21 ± .13	.68 ± .16	.07 ± .09
	Wood	.07 ± .09	.04 ± .07	.04 ± .07	.82 ± .16

(b) Friction model

		Virtual materials			
		Leather	Cork	Denim	Wood
Actual materials	Leather	.39 ± .18	.14 ± .12	.36 ± .18	.11 ± .11
	Cork	.46 ± .23	.43 ± .19	.04 ± .07	.04 ± .07
	Denim	.11 ± .11	.36 ± .18	.46 ± .21	.14 ± .05
	Wood	.04 ± .07	.07 ± .09	.14 ± .15	.71 ± .21

#### 4. 研究成果

図 2 に, 例としてデニムを擦ったときに生じる摩擦 (係数) を, 低周波成分 (物理モデルで実装) と高周波成分 (統計モデルで実装) に分類した様子を示す. 低周波成分によって, 摩擦モデルのパラメータを決定した. 高周波成分からは, 素材に特有の摩擦の周波数スペクトラムを決定した. 参加者実験では, 4 種類の仮想テクスチャを提示し, 参加者はどの素材が提示されているかを 4 者択一で回答した. その正答率・誤答率を表 1 に示す. 表のように, 2 モデルを併用した場合 (表 1 (a)), 正答率はおおむね 70% 以上であったが, 物理モデルだけ (表 1 (b)) では, 4 素材中 3 素材で 50% 以下に低下した. 統計モデルと併用モデルの比較は, 摩擦提示ディスプレイの性質上不可能 (摩擦を増加させることはできるが, 減少させることはできない) であり, 実施しなかった. 正答率の観点からは, 皮革とコルクのテクスチャ提示において, 併用モデルの正答率が有意に高かった. 木材に関しては, 物理モデルのみで十分にその特徴が提示可能であり, 併用モデルのメリットが出せなかったと考える.

より詳細な内容は下記の論文で確認できる. 下記は, テクスチャ提示のために物理モデルと統計モデルを統合する手法について詳説している.

Kazuya Otake, Shogo Okamoto, Yasuhiro Akiyama, and Yoji Yamada, Tactile texture rendering for electrostatic friction displays: Incorporation of low-frequency friction model and high-frequency textural model, IEEE Transactions on Haptics, vol. 15, no. 1, pp. 68-73, 2022. DOI: 10.1109/TOH.2021.3138647

表面触感ディスプレイは, タッチパネルのための触覚提示装置であり, 質の高い触刺激の提示が望まれている. 本研究は, 従前の手法よりも弁別性もしくはリアリズムの点で優れた, 触覚刺激を生成する手法を開発した. 物理モデルと統計モデルの併用方法については, 改良の余地が多く, 本研究で採用した周波数帯による分離は, 安易な方法と言える. 今後は特にこの両モデルの統合方法について注力し研究を進める.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Azechi Mirai, Okamoto Shogo	4. 巻 17
2. 論文標題 Bumps and Dents are Not Perceptually Opposite When Exploring With Lateral Force Cues	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Haptics	6. 最初と最後の頁 52 ~ 57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TOH.2024.3357806	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 Wang Hongbo, Sun Qingyu, Okamoto Shogo	4. 巻 15
2. 論文標題 Surface shape alters perceived material softness	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 i-Perception	6. 最初と最後の頁 1 ~ 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/20416695241245021	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 該当する

1. 著者名 Hsia Tzu-Hsuan, Okamoto Shogo, Akiyama Yasuhiro, Yamada Yoji	4. 巻 9
2. 論文標題 One-touch calibration of hum-noise-based touch sensor for unknown users utilizing models trained by different users	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ROBOMECH Journal	6. 最初と最後の頁 24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40648-022-00238-4	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 該当する

1. 著者名 Sun Qingyu, Okamoto Shogo, Akiyama Yasuhiro, Yamada Yoji	4. 巻 15
2. 論文標題 Multiple Spatial Spectral Components of Static Skin Deformation for Predicting Macroscopic Roughness Perception	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Haptics	6. 最初と最後の頁 646 ~ 654
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TOH.2022.3199082	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 該当する

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 Azechi Mirai, Okamoto Shogo	4. 巻 -
2. 論文標題 Combined virtual bumps and textures on electrostatic friction tactile displays	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE Global Conference on Consumer Electronics	6. 最初と最後の頁 315~317
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/GCCE56475.2022.10014107	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 SUN Qingyu, GUO Junliang, OKAMOTO Shogo	4. 巻 ISASE2022
2. 論文標題 Effects of surface textures and shapes on perceived softness of hard materials	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Symposium on Affective Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5057/isase.2022-C000014	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 Inoue Koki, Okamoto Shogo, Akiyama Yasuhiro, Yamada Yoji	4. 巻 15
2. 論文標題 Surfaces With Finger-Sized Concave Feel Softer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Haptics	6. 最初と最後の頁 32~38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TOH.2021.3138640	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 Hsia Tzu-Hsuan, Okamoto Shogo, Akiyama Yasuhiro, Yamada Yoji	4. 巻 -
2. 論文標題 HumTouch: Localization of a finger in purified water using humming-noise-driven human-body electric currents	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings in IEEE 4th Global Conference on Life Sciences and Technologies	6. 最初と最後の頁 69 ~ 71
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LifeTech53646.2022.9754811	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 Qingyu Sun, Okamoto Shogo, Akiyama Yasuhiro, Yamada Yoji	4. 巻 -
2. 論文標題 Differences in pleasant texture stimuli between fingertips and the palm	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings in IEEE 4th Global Conference on Life Sciences and Technologies	6. 最初と最後の頁 226 ~ 228
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LifeTech53646.2022.9754942	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 -
2. 論文標題 Virtual tactile texture using electrostatic friction display for natural materials: The role of low and high frequency textural stimuli	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication	6. 最初と最後の頁 392 ~ 397
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/RO-MAN50785.2021.9515405	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 Hsia Tzu-Hsuan, Okamoto Shogo, Akiyama Yasuhiro, Yamada Yoji	4. 巻 -
2. 論文標題 Localization performance of hum-noise-based touch sensor (HumTouch) with unknown participants	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE 10th Global Conference on Consumer Electronics	6. 最初と最後の頁 815 ~ 816
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/GCCE53005.2021.9622087	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, Hasegawa Hikaru, Okamoto Shogo, Yamada Yoji	4. 巻 -
2. 論文標題 Virtual roughness textures via a surface tactile texture display using vibrotactile and electrostatic friction stimuli: Improved realism	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 13th International Conference on Human System Interaction	6. 最初と最後の頁 147-152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/HSI49210.2020.9142626	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2件

1. 著者名 大西公平、内村裕	4. 発行年 2022年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 340
3. 書名 ハプティクスとその応用	

1. 著者名 資生堂みらい開発研究所	4. 発行年 2022年
2. 出版社 フレグランスジャーナル社	5. 総ページ数 208
3. 書名 化粧の力の未来	

〔産業財産権〕

〔その他〕

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

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
---------	---------