

令和 4 年 5 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14694

研究課題名（和文）静電摩擦刺激と電気刺激を併用した触覚ディスプレイによる立体形状の触感再現

研究課題名（英文）Tactile reproduction of three-dimensional shapes by tactile display using electrovibration and electrical stimuli

研究代表者

石塚 裕己（Ishizuka, Hiroki）

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：40784418

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では電極のみによって実装することが可能な電気刺激と静電刺激に着目し、その電極を1 mmの密度に配置した触覚ディスプレイを作製する。電気刺激によって皮膚浅部にあるメルケル触盤とマイスナー小体を、静電刺激によって皮膚を振動させることで皮膚深部にあるパチニ小体をそれぞれ刺激することを目的としている。また、電極と電源のみで刺激できることから、小型化も期待できる。そして、本触覚ディスプレイを用いて凹凸のような立体形状の再現を試みたところ、最大で0.5 mmの凸形状を再現でき、その再現率は主観で6割程度という結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で作製した触覚ディスプレイは電気刺激と静電刺激のために電極のみを必要とすることから小型化が容易であり、例えばITOのような透明な導電性材料を用いることでタッチパネル上にも実装が可能である。本研究を通じて明らかにした凸形状の再現は、タッチパネル上での触感再現の範囲を示す上で有意義な結果である。特にVCMやリニアアクチュエータのような大型のアクチュエータを用いずとも平坦なタッチパネル上に凸形状を再現できるということは、タッチパネルを通じた触感提示やインタラクションの範囲を広げることに繋がると期待できる。今後、刺激の条件を詳細に検討することで、より大きい形状の再現についても検討を進めていく。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focus on electrical and electrovibration stimulation, which can be implemented only by electrodes, and fabricate a tactile display with electrodes arranged at a density of 1 mm. We aim to stimulate Merkel's tactile disc and Meissner's body in the shallow part of the skin by electrical stimulation and Pачini's body in the deep part of the skin by vibrating the skin by electrovibration stimulation, respectively. The device is expected to be compact because it requires only an electrode and a power supply. We attempted to reproduce three-dimensional shapes such as bumps using this tactile display, and found that it could reproduce a convex shape of 0.5 mm at the maximum, with a subjective reproducibility of about 60%.

研究分野：ヒューマンインタフェース

キーワード：触覚 Haptics 電気刺激 静電刺激 MEMS

1. 研究開始当初の背景

近年、バーチャルリアリティやヒューマンインターフェースをはじめとする様々な分野において、視覚情報や聴覚情報に加えて触覚情報を提示することが求められつつある。使用者に対して、アクチュエータの振動等を用いて、仮想敵に触感を提示する装置は触覚ディスプレイと呼ばれており、これまでに多くの研究者によって研究が進められてきている。しかし、その触覚ディスプレイを通じてよりリアリティのある触感を再現する方法についてはその多くが未だ明らかになっていない。人間は外部から触感を感じ取る際、皮膚内に存在する数多くの触覚受容器が受け取った刺激を知覚しており[1]、触覚受容器はその種類ごとに異なる触感を知覚していることが知られている[2]。圧力や低周波振動は皮膚浅部にあるメルケル触盤、低周波振動(~30 Hz)はマイスナー小体が、高周波振動(~200 Hz)はパチニ小体が応答することが実験によって明らかにされている。我々人間はものに触れた際には、これらの触覚受容器が特異な応答をし、その情報によって物体表面の触感を認識しているのである。物体を触った際の触覚受容器の応答を触覚ディスプレイを用いて完全に再現することができれば、理論上は物体の触感を仮想的に再現することができるはずである。しかし、既存の触覚ディスプレイは単一の振動提示用のアクチュエータから構成されることが多いことから複雑な触覚受容器の応答を制御することはできず、また、その振動の分布を提示することができないという問題があった。従って、触覚情報とアクチュエータの振動波形とを符号的に結び付けることで触覚提示を行っており、リアリティには欠けてしまっているという現状になっている。

以上の現状を踏まえて、本研究では電極のみによって実装することが可能な電気刺激と静電刺激に着目し、その電極を 1 mm の密度に配置した触覚ディスプレイを作製する。電気刺激によって皮膚浅部にあるメルケル触盤とマイスナー小体を、静電刺激によって皮膚を振動させることで皮膚深部にあるパチニ小体をそれぞれ刺激することを目的としている。また、電極と電源のみで刺激できることから、小型化も期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、この触覚ディスプレイを作製し、電極のみを用いて立体的な凸形状を触覚ディスプレイ上に再現できるかについての調査を行う。

3. 研究の方法

図1と図2に電気刺激と静電刺激の原理をそれぞれ示す。電気刺激を行うためには電源の高電圧側と低電圧側に接続された2つの電極を用いる。この電極の上に皮膚を乗せることで、皮膚に電流が流れる。この電流が触覚神経を刺激することで、神経活動が生じ刺激を知覚する。静電刺激を行うためには、絶縁層に覆われた電極を電源の高電圧側に接続し、人体を低電圧側に接続する。この状態で皮膚を電極に近づけると皮膚と電極の電位差によって絶縁層が誘電分極して帯電する。その結果、皮膚には静電気が生じて電極側へ引き寄せられる。この状態で指をスライドさせることで、皮膚に生じる摩擦力が増加し、抵抗を感じるようになる。

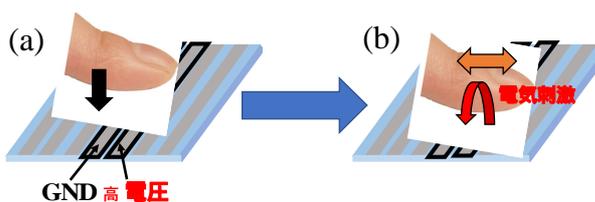


図1 電気刺激の原理

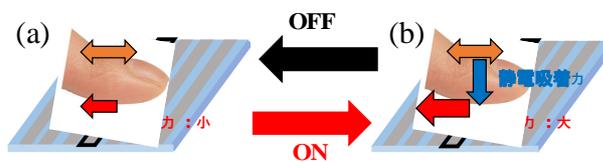


図2 静電刺激の原理

高電圧を制御可能な回路を用意した後、電気刺激用の電極と静電刺激用の電極を金属薄膜の蒸着とエッチングを組み合わせることでガラス基板上に形成した。電気刺激用電極は皮膚に直接接触させる必要があるため、静電刺激用電極を覆う絶縁層上に再度クロム膜を形成し、電気刺激の回路パターンを描画することで電極を露出させた。電気刺激は2つ以上の電極を用いて官能実験を行うため、電極の設計において2点弁別閾を考慮する必要がある。2点弁別閾値は2点を同時に刺激したときにそれが別々の点であると認識できる距離を指す。人の指先における2点弁別閾値は2 mm とされるため、本研究では電極中心間距離を2 mm に設定した。電極寸法は、横幅 0.9 mm、長さ 18 mm の長方形で、鱗口クリップ接続部は 1.5 mm 四方の正方形とした。触覚ディスプレイの設計寸法を図3に、実際に作製した触覚ディスプレイの外観を図4に示す。

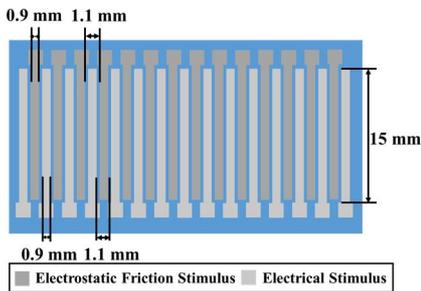


図3 設計寸法

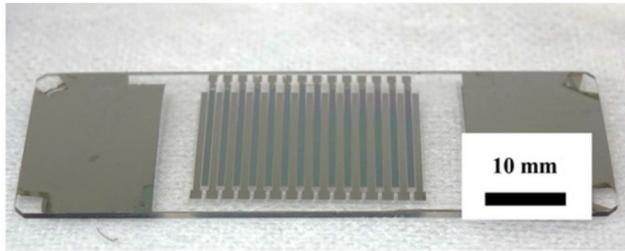


図4 実際に作製した触覚ディスプレイ

4. 研究成果

電気刺激と静電刺激を用いることでリアルな凸形状を触覚ディスプレイ上に再現できるかの調査を行った。

まず事前実験として、電気刺激を「圧力」として感じる閾値電流値、静電刺激を「摩擦」として感じる閾値電圧値と、それらの周波数条件を決定した。凸形状をなぞった際にはその形状によって皮膚に圧とせん断力が印加されていることから、これらの条件を選定した。指のなぞり速度は 50 mm/s として、それぞれの刺激に対する閾値の 1.2 倍、1.4 倍、1.6 倍したものを刺激の強度として、周波数条件は 20, 40, 80, 160, 320Hz の 5 種類を採用し、電機刺激はパルス幅 200 μ s のパルス波、静電刺激の duty 比は 20% とした。各条件について 7 段階のリッカートスケール(電気刺激の場合：1:振動, 7:圧力, 静電刺激の場合：1:振動, 7:摩擦)によって知覚する圧力や摩擦を評価した。被験者は各条件を 1 度試し、それぞれの刺激について 15 回ずつ実験を行った。尚、被験者は 8 名であった。

電気刺激と静電刺激の実験の平均値を図 5 と図 6 に示す。どちらの場合にも、周波数が高くなるにつれて、圧力と摩擦と回答されるスコアが高くなる傾向が得られた。更には、閾値の 1.6 倍の場合に、それらのスコアが高くなるような傾向も見られた。以上のことから、周波数を 320 Hz として電気刺激と静電刺激を提示することとした。

その後、触覚ディスプレイによって得られた触感によってどのような形状を再現することができるかやその触感は現実の触感とどの程度類似しているかを調査するため、電気刺激と静電刺激の組み合わせを被験者に提示し、3D プリンタによって製作した高さの異なる棒状段差形状を持つ触覚サンプルと比較した。周波数はどちら 320 Hz として、電流値と電圧値は提示無し、閾値、閾値の 1.3 倍、1.6 倍、1.9 倍とした。被験者には、知覚した触感と最も類似した段差形状を選択するよう指示を行った。触覚サンプルには 9 種類の段差(0.2 mm ~ 1.8 mm)があり、この中から最も最も近い形状を選ぶように指示した。また、その際には組み合わせた触覚刺激によって感じられた表面触感がどれだけのリアリティを持っているかを 7 段階のリッカートスケールで評価した。数字が大きいほど実物(触覚サンプル)に近い触感が得られたことを示し、被験者は実物の表面触感から遠くなるほど 1 に近い数値で評価するよう指示された。尚、被験者は 8 名とした。

表 1 より、参加者は電気刺激だけを提示した場合や静電刺激のみを提示した場合には高さ 0.3 mm 以下の段差形状を知覚したことが確認された。電流や電圧の値を上げると被験者が痛みを感じることもあり、今回最大の電流や電圧の値を 1.9 倍としている。つまり、単一の刺激ではこの程度の大きさが限界となる。同時に提示割した場合には、最大で 0.5 mm 程度の大きさまで提示可能になることが確認できた。このことから、電気刺激と静電刺激を組み合わせることで、単一の刺激よりも大きい形状が再現できることが確認できた。これは皮膚の圧力と摩擦を同時に提示することで、より実際の場合に近い感覚を得ていることが理由として考えられ

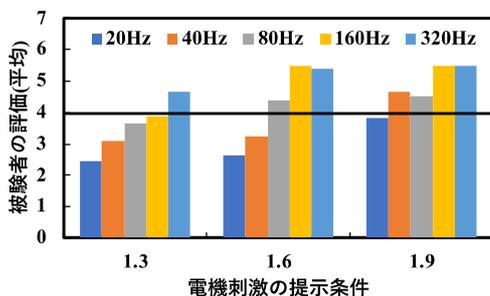


図5 電気刺激による知覚した圧力のスコア

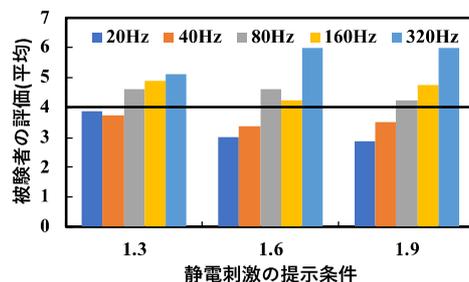


図6 静電刺激による知覚した圧力のスコア

る．表 2 から，形状のリアリティが高いと評価された代表的な複数刺激の組み合わせは(電気 : 1.9, 静電 : 1.0) , と(電気 : 1.9, 静電 : 1.3)であった．高いリアリティを得た組み合わせはいずれも電気刺激が高く，静電刺激が低い組み合わせであったことから，触感のリアリティに大きな影響を与えるのは電気刺激の強さであると考えられる．高いリアリティを得た組み合わせが，2 種類の刺激のうちどちらか片方が高い条件であったことは，従来研究[3]と比較して妥当な結果であると言える．しかしながら，知覚された触感のリアリティは最大で約 4 (60%)であったことから，本実験の条件下では，複合刺激によって与えられる触感は現実に存在する実際の段差とは異なるものであった．この理由としては 3D プリンタの造形物の材質による影響や，刺激入力のタイミングの制御が加味されていなかったことが理由として考えられる．この点については今後の研究で改善を試みる．

表 1 複数刺激により知覚した段差形状

(上) 知覚した段差形状の平均 (mm), (下) 標準偏差

		電機刺激の出力値(閾値電流値のn倍)				
		0	1	1.3	1.6	1.9
静電刺激の出力値 (閾値電圧値のn倍)	0	0 (0)	0.15 (0.07)	0.24 (0.09)	0.29 (0.14)	0.30 (0.14)
	1	0.18 (0.09)	0.25 (0.14)	0.25 (0.10)	0.30 (0.12)	0.33 (0.12)
	1.3	0.25 (0.09)	0.30 (0.10)	0.36 (0.12)	0.39 (0.12)	0.39 (0.12)
	1.6	0.21 (0.06)	0.35 (0.09)	0.38 (0.10)	0.43 (0.13)	0.46 (0.15)
	1.9	0.26 (0.09)	0.34 (0.11)	0.39 (0.12)	0.43 (0.12)	0.49 (0.15)

表 2 複数刺激により知覚した触感のリアリティ

(上) 知覚した触感の類似性, (下) 標準偏差

		電機刺激の出力値(閾値電流値のn倍)				
		0	1	1.3	1.6	1.9
静電刺激の出力値 (閾値電圧値のn倍)	0	0 (0)	1.63 (0.71)	2.75 (0.83)	3.25 (0.66)	4.00 (1.23)
	1	2.63 (1.42)	2.75 (1.20)	3.38 (1.42)	4.00 (1.00)	4.63 (1.42)
	1.3	3.13 (1.27)	3.38 (2.06)	3.13 (1.97)	3.38 (1.11)	4.25 (1.20)
	1.6	4.38 (1.11)	3.25 (1.40)	3.00 (1.87)	3.50 (1.23)	3.25 (1.40)
	1.9	4.00 (1.58)	2.63 (0.86)	3.00 (1.23)	3.25 (1.09)	3.50 (1.87)

参考文献

[1] Jones, et al.: Human hand function, Oxford New York: Oxford University Press, (2006).
 [2] Muniak at al.: The Neural Coding of Stimulus Intensity: Linking the Population Response of Mechanoreceptive Afferents with Psychophysical Behavior, J. Neuron., , Vol. 7, No.4 pp. 11687–11699 (2007).
 [3] Ito, et al.: Tactile Texture Display with Vibrotactile and Electrostatic Friction Stimuli Mixed at Appropriate Ratio Presents Better Roughness Textures, ACM Transaction on Applied Perception, Vol.16, No.4, Article 20 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Komurasaki Seiya, Kajimoto Hiroyuki, Shimokawa Fusao, Ishizuka Hiroki	4. 巻 12
2. 論文標題 Characterization of an Electrode-Type Tactile Display Using Electrical and Electrostatic Friction Stimuli	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 313 ~ 313
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/mi12030313	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 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Seiya Komurasaki, Hiroyuki Kajimoto, Fusao Shimokawa, Hiroki Ishizuka
2. 発表標題 Characterization of an Electrode-type Tactile Display Using Electrical and Electrostatic Stimuli
3. 学会等名 MNC 2022（国際学会）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

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