

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01404

研究課題名(和文)超音波フェーズドアレイによる遠隔からの表面摩擦感制御

研究課題名(英文)Friction Change Tactile Display Remotely Oscillated by Airborne Ultrasound Phased Array

研究代表者

牧野 泰才(Makino, Yasutoshi)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：00518714

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、超音波フェーズドアレイを利用して遠隔から表面摩擦を変化させる触覚ディスプレイを実現すること、およびその基本的特性の解明を目指したものです。本研究を始める前の段階で、超音波の焦点を利用すると、発泡スチロール表面の摩擦が低下することが確認されていました。本研究はこれに対して、1)発泡スチロール表面の摩擦低減現象の解明、2)発泡スチロールを利用した、摩擦変化型インタラクティブシステムの実現、3)適切な共振構造による発泡スチロール以外の表面での摩擦低減の検討、の3つのアプローチによりこの分野の進展を実現したものです。
“ディスプレイ側が不要な触覚ディスプレイ”という、新しい価値を提案できました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

タッチパネルの普及により、操作表面に触覚を付与するという研究が近年盛んになっています。これまでに、対象表面側に駆動系を搭載し、表面の摩擦を変化させる手法が多く提案されています。本提案は、環境側に超音波フェーズドアレイを設置することで、対象表面側に機器を必要としない新しい摩擦変化型触覚ディスプレイを実現するものです。発泡スチロール表面の摩擦を変化させられることから、対象表面が汚れたら入れ替える、という使い方が可能になります。このような遠隔からの摩擦変化が可能となる条件を検証し、発泡スチロールに代わる実現方法まで含めて検討した点において、本研究成果の学術的意義があります。

研究成果の概要(英文)：This research aimed to realize a tactile display that changes surface friction remotely using ultrasound phased array, and to elucidate its basic characteristics. Before starting this project, it was confirmed that the friction on the polystyrene foam surface was reduced by using the ultrasound focus. This research has made progress in this field by taking the following three approaches: 1) clarification of the phenomenon of friction reduction on the surface of polystyrene foam, 2) realization of a friction-changing interactive system using polystyrene foam, and 3) investigation of friction reduction on surfaces other than polystyrene foam using an appropriate resonant structure.

We proposed a new concept of a "disposable tactile display" because the device does not need to be mounted on the target surface.

研究分野：触覚情報処理

キーワード：触覚ディスプレイ 空中超音波 超音波フェーズドアレイ

1. 研究開始当初の背景

近年の触覚研究の1つの分野として、Surface Haptics と呼ばれる分野がある。これは、対象表面の摩擦を変化させることで、タッチパネルを搭載したタブレット端末等の表面において多様な触感を生成するというものである。この方法は大きく2つの方法に分類することが出来る。1つは静電気を利用し、指先と対象との間に吸着力を発生させることで摩擦を増加させる方法である。もう1つは超音波のスウィーズ効果を利用し、対象と指先との間の摩擦を減少させる方法である。どちらの方法も、対象表面に適切な駆動デバイスを搭載する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上記のような超音波により対象表面の摩擦を低減させる方法において、対象表面に何らかの駆動デバイスを搭載するのではなく、外部に配置した環境型の装置により対象表面を遠隔から励振することで、同様に摩擦変化を生じさせるようなシステムを実現することである。

本研究を開始する前の予備検討の段階で、超音波フェーズドアレイを利用し、発泡スチロール表面に集束超音波を照射した場合、その表面の摩擦感が低減することが確認されていた。本研究では、この摩擦変化が生じる仕組みを解明するとともに、本手法の特徴を生かした新しい摩擦変化型の触覚ディスプレイの実現を目的とした。

3. 研究の方法

本研究は大きく3つの方法でこの分野を進展させることに貢献した。

1) 発泡スチロール表面の摩擦低減現象の解明

上述のように、予備検討段階において発泡スチロール表面で摩擦変化が生じることが確認されていた。そこでまず、発泡スチロール表面に超音波を照射した場合に、対象表面でどのような振幅で振動が生じているのかを計測し、またそこを指先で撫でたときに、水平方向の力が超音波の照射の有無でどの程度変化するかについて検証した。また、他の素材での実現可能性を考え、適当な素材表面に超音波を照射し、同様に摩擦変化が生じるか等を比較検討し、発泡スチロール表面でこの現象が生じる原因を解明した。

2) 発泡スチロールを利用した、摩擦変化型インタラクティブシステムの実現

1)の検討により、本提案手法は試した素材の範囲内では、発泡スチロールでのみ生じるものであり、他の素材、例えばスマートフォン表面で利用されるガラス等ではこの現象が生じないことが確認された。そこで、発泡スチロール表面を利用した新しい摩擦変化型のインタラクティブシステムの実現を目指した。対象が発泡スチロールに制限されるという制約はあるが、触る表面側に特別なデバイスを搭載する必要がないため、ディスプレイという、新しい価値を提案できることに着目した。2次元的な発泡スチロール表面上に映像を投影し、その映像に応じた超音波刺激を提示することで、多様な摩擦変化を提示可能なシステムを実現した。

3) 適切な共振構造による発泡スチロール以外の表面での摩擦低減の検討

上述のように、既存の素材を利用した場合には、基本的には発泡スチロールという素材でのみ摩擦変化が生じることが確認された。一方、そのとき表面が大きく変位していることが確認されたため、超音波の駆動周波数で共振するような適当な構造を持つことで、摩擦低減が可能になると期待される。薄膜とその下の空間の空気の利用した共振構造を設計し、そのような対象表面で摩擦が低減することを確認した。

4. 研究成果

上述の3つの方法に対する成果についてそれぞれ詳細を述べる。

1) 発泡スチロール表面の摩擦低減現象の解明

発泡スチロール表面の摩擦が低下することを調べるために、まず表面の変位を計測した。摩擦変化を感じられないアクリル表面や段ボールなどにおいても同様の計測を行った結果、発泡スチロール表面においてのみ、駆動している超音波の40kHzの振動が生じていることが確認された。その振幅は5 μ m程度であり、一般的に固体表面のスウィーズ効果が生じるとされる振動振幅よりも十分大きいことが確認された。

この時、発泡スチロール表面の下に、触覚フォースプレートという力計測装置を配置し、人が表面をなでたときに垂直方向の力と水平方向の力がそれぞれどのように変化するかを計測した。その結果、超音波を照射している領域をなぞっているときに、垂直方向の力が変化しないのに対して、水平方向の力が減少するという現象が確認された。すなわち、物理的に摩擦が減少したことで、水平方向の力が小さくなっているという結果である。他の摩擦変化を知覚出来ない表面ではそのような変化は見られず、やはり発泡スチロール表面でのみ摩擦が低下することが確認された。このような表面を人に触ってもらい、そのとき知覚出来るかどうかの心理物理実験も行い、発泡スチロールでのみ知覚できるという同様の結果を得ている。

本成果は基礎検討について国内会議にて発表し[1]，より詳細な成果については，触覚分野のトップ論文誌である Transaction on Haptics 誌に現在投稿中（査読が完了し，修正版を投稿準備中）である．

2) 発泡スチロールを利用した，表面摩擦変化型インタラクティブシステムの実現

提案手法の実応用事例として，表面摩擦変化型のインタラクティブシステムを実現した．図1にシステムの写真を示す．斜め45度に配置した超音波フェーズドアレイより，発泡スチロール表面へ超音波を照射する．プロジェクトによりいくつかのパターンを投影し，その映像とインタラクションする際の指先位置を側面に配置した赤外線センサにより取得する．指先位置と画像情報とに応じて超音波照射のオンオフを切り替えることで，映像に同期した摩擦変化を提示し，多様なテクスチャを表現可能である．

本提案手法は大きく以下3つの利点がある．

- 1) 対象表面に駆動系を搭載する必要がなく，発泡スチロール面を容易に入れ替え可能
- 2) 環境側に駆動デバイスを配置しているため，対象表面のサイズを大きくできる
- 3) 二次元面である必要がなく，指と超音波フェーズドアレイの位置関係が適切であれば，3次元化も可能

本システムは実際に体験できるデモシステムとして SIGGRAPH ASIA 2019 [2]にて展示し，5日間に渡り多くの来場者に体験してもらうことが出来た．

この3つ目の特徴を生かした第2世代のシステムとして，図2に示すような3次元にも対応したシステムを実現した．2次元のときとの大きな違いは，指先のトラッキング部分である．2次元のときは規定された平面との接触を検出すればよかったため，二次元的な赤外線センサにより位置を取得していた．今回は3次元的な面との接触を検出するため，深度センサにより，まず接触対象の形状を3次元的に計測し，それに対して指先が触れたかどうかをカラートラッキングと深度センサの情報を組み合わせることで判定した．本手法の基礎的な成果は，インタラクション関係のトップカンファレンスである CHI の Late Breaking Work [3]として発表した．

本提案手法を実現するに当たり，対象表面の加工方法が，触覚に大きく影響することが確認された．熱により発泡スチロール表面をカットして加工した場合，熱変性による硬化の影響で摩擦が感じにくくなるということが確認された．今回は摩擦を感じやすい製造されたときの表面をそのまま触れるように加工しており，今後の応用としては適切な加工方法の検討が必要と考えている．

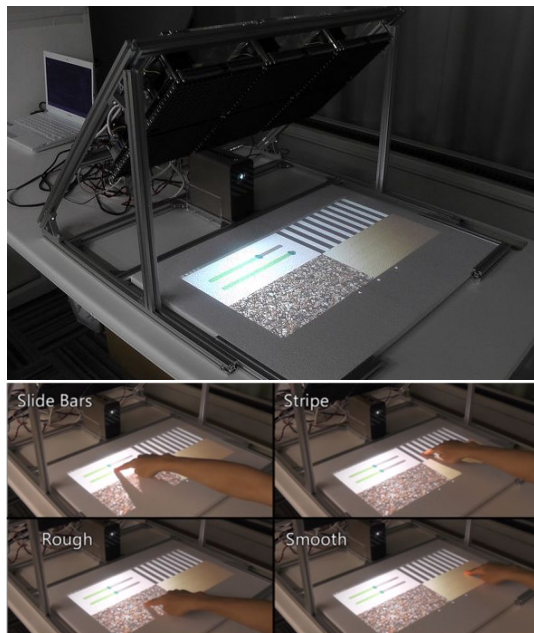
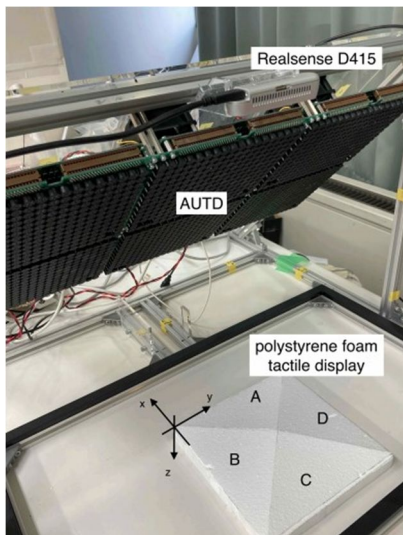


図1(上): 2次元のプロジェクション映像とのインタラクションシステム．指先位置を検出し，位置に応じて超音波出力を制御する

図2(左): 深度センサによる3次元化システム．四角錐状の対象について同様に摩擦変化が生じることを確認した

3) 適切な共振構造による発泡スチロール以外の表面での摩擦低減の検討

上記1) 2)の研究により，この摩擦低減が生じるための条件としては，対象表面が超音波で励振できる程度に柔らかく（音響インピーダンスが小さく），一方で，人の触察に対して大変形しない程度には硬い表面である必要があることが確認された．いくつかの素材について，発泡スチロール表面と同様の摩擦変化が生じないかを確認したが，素材そのものについては同様の摩擦変化を得られるものを見つけることが出来なかった．そこで次に，適切な共振構造を設計し，それにより大きく振動している膜の表面を指で触れる事により摩擦変化が知覚されるかどうかを検証することとした．

図3に実現した共振構造の模式図と実試作を示す．ポリイミドフィルムの薄膜を円形状の開口の上に貼付し，対向する開口を硬いアクリルで塞ぐ．このとき，ポリイミド膜の質量によるマ

スト、円形開口内の空気によるバネ性で決まるバネ - マス系の共振周波数を、超音波の搬送周波数である 40kHz と一致するように設計する。このようにすると、ポリイミド膜の円形開口面が超音波振動し、その上をなでたときに摩擦感が大きく変化することが確認された。開口のサイズや、対向するアクリル板との間の距離などのパラメータを適切に調整することで、発泡スチロール表面よりも強い効果を得られることが確認された。

本成果は、このような適切な共振構造をデザインすることで、発泡スチロールという素材に制限されること無く、外部から摩擦変化を生じさせられることを示すものであり、提案手法の応用可能性を拓ける重要な成果である。本成果は触覚分野のトップ論文誌である Transaction on Haptics 誌に採録され[4]、現在 Early Access の状態で公開されている。

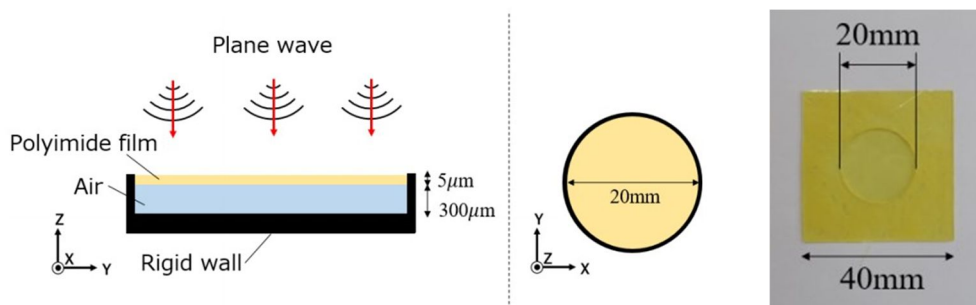


図3 空気バネによる共振を利用した膜の模式図と試作

参考文献

- [1] 大森 亮, 濱崎 龍馬, 荒川 陸, 井上 碩, 藤原 正浩, 牧野 泰才, 篠田 裕之, “集束超音波による発泡スチロール表面での摩擦低減,” 第 19 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2018) 論文集, pp.1365-1369, 大阪工業大学 梅田キャンパス, 大阪, Dec.13-15, 2018.
- [2] Task Ohmori, Yuki Abe, Yu Someya, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, Hiroyuki Shinoda, “ReFriction: Remote friction control on polystyrene foam by ultrasonic phased array,” SIGGRAPH Asia '19 Emerging Technologies, Brisbane, Australia, November 17-20, 2019, DOI:<https://doi.org/10.1145/3355049.3360522>.
- [3] Task Ohmori, Yuki Abe, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. 2021. Remote Friction Control on 3-dimensional Object Made of Polystyrene Foam Using Airborne Ultrasound Focus. In Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '21). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 226, 1-5. DOI:<https://doi.org/10.1145/3411763.3451598> (Open Access)
- [4] Yuki Abe, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, Hiroyuki Shinoda, “Remote Friction Reduction on Resonant Film Surface by Airborne Ultrasound,” IEEE Transactions on Haptics, 2021. (Open Access, Early Access) doi: 10.1109/TOH.2021.3075979

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 Abe Yuki, Fujiwara Masahiro, Makino Yasutoshi, Shinoda Hiroyuki	4. 巻 2
2. 論文標題 Remote Friction Reduction on Resonant Film Surface by Airborne Ultrasound	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Haptics	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TOH.2021.3075979	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5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Task Ohmori, Yuki Abe, Yu Someya, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, Hiroyuki Shinoda
2. 発表標題 ReFriction: Remote friction control on polystyrene foam by ultrasonic phased array
3. 学会等名 SIGGRAPH Asia '19 Emerging Technologies（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阿部 祐貴, 藤原 正浩, 牧野 泰才, 篠田 裕之
2. 発表標題 ヘルムホルツ共鳴アレイを用いた表面インピーダンス制御
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大森 亮, 濱崎 龍馬, 荒川 陸, 井上 碩, 藤原 正浩, 牧野 泰才, 篠田 裕之
2. 発表標題 集束超音波による発泡スチロール表面での摩擦低減
3. 学会等名 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Task Ohmori, Yuki Abe, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, Hiroyuki Shinoda
2. 発表標題 Remote Friction Control on 3-dimensional Object Made of Polystyrene Foam Using Airborne Ultrasound Focus
3. 学会等名 CHI EA '21: Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阿部 祐貴, 藤原 正浩, 牧野 泰才, 篠田 裕之
2. 発表標題 遠隔超音波照射によるフィルム状デバイス表面の摩擦低減
3. 学会等名 第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ReFriction https://hapislab.org/research-topics/refraction 超音波で多様な触覚を生成 東大が開発した「ReFriction」 https://www.itmedia.co.jp/news/articles/1912/25/news134.html SICE S12020 優秀講演賞 (阿部祐貴, 藤原正浩, 牧野泰才, 篠田裕之)
--

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