

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K19847

研究課題名（和文）選択的熱放射による物体の変形制御を利用した大面積・高解像度触覚ディスプレイの研究

研究課題名（英文）Large-area and High-resolution Haptic Display by Controlling Material Deformation using Thermal Projection

研究代表者

平木 剛史（Hiraki, Takefumi）

筑波大学・図書館情報メディア系・助教

研究者番号：40831326

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、選択的な熱放射によって対象物体を加熱し、その変形を制御することで、柔軟で大面積、かつ高解像度な触覚ディスプレイを実現可能な技術を構築した。振動刺激については、短パルスレーザー光を光吸収素材に照射し、熱弾性効果を生じさせることで実現した。ナノ秒パルスレーザーを樹脂テープに照射した際に実際に振動触覚が生じることを確認し、またこれにより指先に振動提示が可能な空中触覚ディスプレイを構築した。力覚提示については、液相-気相転移アクチュエータをアレイとして構成し、これをCO2レーザーの走査によって独立に制御することで、空間分布の制御が可能で、軽量、かつ柔軟な力覚ディスプレイを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、従来は実現できていなかった柔軟かつ大面積な触覚ディスプレイを高解像度での触覚刺激提示が可能な形で実現するための基盤技術を開発することができた。これは、触覚ディスプレイを中心とするヒューマンインターフェース開発において大きな学術的意義を持つと言える。また、Society 5.0の進展により、サイバー空間の情報を現実空間の人間に対してフィードバックするためのキー技術となりうる触覚ディスプレイの重要性は増加しており、その配置や組み込み、また提示できる刺激の自由度を向上させることができる本技術の構築は社会的にも大きな意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：In this research, we have developed a technology that enables the realization of a flexible, large-area, and high-resolution tactile display by selectively heating the target object through selective thermal radiation and controlling its deformation. For vibration stimulation, we achieved it by irradiating a short-pulsed laser light onto a light-absorbing material, inducing a thermoelastic effect. We confirmed the actual occurrence of vibrational tactile feedback when irradiating a nanosecond-pulsed laser onto a resin tape, and we also constructed an airborne tactile display capable of providing vibrational feedback to the fingertips.

For force feedback, we constructed a lightweight and flexible force display by configuring a liquid-to-gas phase change actuator as an array and independently controlling it through scanning with a CO2 laser, enabling control of spatial distribution.

研究分野：拡張現実感

キーワード：ソフトロボティクス 力覚ディスプレイ 相転移アクチュエータ 触覚ディスプレイ 短パルスレーザ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

これまでのディスプレイ技術は主に視聴覚刺激を対象として発展してきたが、遠隔コミュニケーションや遠隔作業支援といった用途を念頭に、触覚刺激を提示するディスプレイの研究が高まりを見せている。しかし、従来の触覚ディスプレイのほとんどは、多くの機械部品によって構成されており、これらは重く、硬いためにディスプレイの形状が制約され、また大面積化への障害にもなっていた。また、ディスプレイが提示する触覚刺激の解像度は触覚提示素子の密度に対応していたため、その物理サイズや金銭的成本の問題が解像度の向上を阻んでいた。そして、その設計、作製は機械設計と加工の知識が必要であり、構造の変更などが生じた際の対応コストは高いという課題も存在した。

2. 研究の目的

本研究では、選択的な熱放射によって対象物体を加熱し、その変形を制御することで、柔軟で大面積、かつ高解像度な触覚ディスプレイを実現可能な技術を構築する。具体的には、熱吸収性素材の加熱による熱弾性変形により振動刺激を、パウチに封入した低沸点液体の加熱による気化膨張を利用して力覚刺激を提示する。赤外ナノ秒レーザーとCO₂レーザーを光源に持つレーザー走査プロジェクタによって、選択的な熱照射を高い解像度で実現する。加えて、それぞれの投影対象が持つ光の波長透過・吸収特性を利用することで、それぞれの物体を選択的に加熱し、振動覚と力覚の提示を制御する。これによって、従来は実現できていない柔軟、大面積な触覚ディスプレイを高解像度での触覚刺激提示が可能な形で実現する。また、これを用いたアプリケーションの提案とそのユーザ評価を通じて、インタフェースとしての有用性を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、赤外レーザーを光源とする熱照射制御システムを用いて、(1) 物体の熱弾性変形を用いた大面積・高解像度な振動覚ディスプレイと、(2) 物体の気化膨張を用いた大面積・高解像度な力覚ディスプレイの2つの研究項目に取り組む。

研究項目(1)については、赤外ナノ秒レーザーを光源とするレーザー走査プロジェクタを開発し、これを用いた熱照射制御(熱投影)システムを構築する。また、この熱投影システムで光吸収性素材を加熱し、これにより物体内に生じる音響波でユーザに振動を提示する振動覚ディスプレイを開発する。光吸収性素材にナノ秒レーザーを照射するとレーザー光は瞬時に対象に吸収されるため、短時間で局所的に加熱された状態となる。このような温度分布は機械的な応力を発生させ、物体の弾性変形をもたらす。この変形によって弾性波が生じ、音響波の形で伝播することで、接触している人間に対し振動覚を生じさせることが知られている。この現象は従来単点への照射と振動覚提示で報告されていたが、本研究では高速なレーザー走査によって空間分割された加熱を実現することで、大面積・高解像度な振動覚ディスプレイを実現する。

研究項目(2)については、遠赤外光を照射できるCO₂レーザーを光源とするレーザー走査プロジェクタを開発し、これを用いた熱投影システムを構築する。提案した熱投影システムで液相-気相転移アクチュエータを加熱し、気化膨張により変形させることで、ユーザに圧力を提示する力覚ディスプレイを開発する。液相-気相転移アクチュエータは、フィルムを熱融着したパウチに低沸点液体を封入、密着することで作製されるアクチュエータである。これを加熱すると、低沸点液体は液相から気相へ相転移して体積が変化する(気化膨張)ため、これを利用して構造を変形させ、駆動する。本研究ではこの液相-気相転移アクチュエータをアレイ状に配置することで、大面積・高解像度な力覚ディスプレイを実現する。

4. 研究成果

研究項目(1)については、選択的な熱放射によって対象物体を加熱し、その変形を制御することで、柔軟で大面積、かつ高解像度な触覚ディスプレイを実現可能な技術を構築した。振動刺激については、赤外ナノ秒レーザー光を光吸収素材に照射し、熱弾性効果を生じさせることで実現した。赤外ナノ秒レーザーを光源とするレーザー走査型プロジェクタについて、ガルバノスキャナを用いたシステムを開発し、またこのプロジェクタと光吸収素材を用いた、熱弾性効果による振動覚ディスプレイについて研究開発を実施した。実験の結果、ナノ秒レーザーを樹脂テープに照射した際に実際に振動触覚が生じることを確認し、またARマーカのトラッキングによって指先の位置に振動提示が可能な触覚ディスプレイシステムが構築できたことも確認した。

研究項目(2)については、まず低沸点液体の気化膨張を利用する液相-気相転移アクチュエータを用いた力覚ディスプレイについての研究開発に取り組んだ。10 mm角の液相-気相転移アクチュエータとペルチェ素子を指先に装着可能なウェアラブルデバイスの形で構成することで、

力覚ディスプレイとして構成した(図1)。これにより、エアコンプレッサーやチューブを使わない形で、小型、軽量、かつ柔軟な力覚ディスプレイを実現できた。また、気圧・温度センサを内蔵することで、アクチュエータ内の温度と内圧を計測できる手法を開発し、これにより力覚提示を制御する手法を開発するとともに、ディスプレイのヒステリシスや温度変化についても詳細な実験を行い、その特性を多面的に評価した。そして、本成果に立脚して、液相-気相転移アクチュエータをアレイとして構成できるように XYZ テーブルを用いた作製装置を開発し、これを CO2 レーザーの走査によって独立に制御することで、空間分布の制御が可能で、かつエアコンプレッサーやチューブが不要な小型、軽量、かつ柔軟な力覚ディスプレイシステムを構築した。



図1：液相-気相転移アクチュエータを用いた力覚ディスプレイ

また、液相-気相転移アクチュエータの基盤技術開発として、弾性変形が可能、かつ小型の構造を持つ液相-気相転移アクチュエータを開発した(図2)。ラテックスゴム製のパウチを、低沸点液体の封入まで統合する形で、マイクロナノ技術を用いたウエットプロセスによって作製する手法を新たに構築した。これにより、小型であるにも関わらず、弾性変形により初期の大きさの8.6倍以上に膨張、変形することが可能な液相-気相転移アクチュエータを実現した。また、液体金属を用いたヒーターを内蔵した小型、かつ高い柔軟性と曲げ耐性を持つ液相-気相転移アクチュエータを開発した。低沸点液体と液体金属ヒーターを、ワイヤーモールド法を用いて袋状構造に封入することで作製する手法を構築した。加えてさまざまなサイズのアクチュエータを用いて発生する力、変位、時間応答を評価し、また1000回曲げても動作することを確認した。

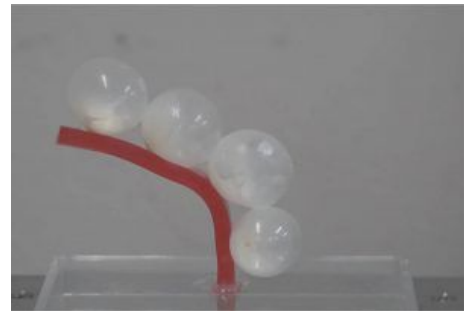


図2：弾性変形が可能な液相-気相転移アクチュエータ

本研究により、従来は実現できていなかった柔軟かつ大面積な触覚ディスプレイを高解像度での触覚刺激提示が可能な形で実現するための基盤技術を開発することができた。

これは、触覚ディスプレイを中心とするヒューマンインターフェース開発において大きな学術的意義を持つと言える。

また、Society 5.0の進展により、サイバー空間の情報を現実空間の人間に対してフィードバックするためのキー技術となりうる触覚ディスプレイの重要性は増加しており、その配置や組み込み、また提示できる刺激の自由度を向上させることができる本技術の構築は社会的にも大きな意義を持つ。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Seiya Yamaguchi, Takefumi Hiraki, Hiroki Ishizuka, and Norihisa Miki	4. 巻 12(2)
2. 論文標題 Handshake Feedback in a Haptic Glove Using Pouch Actuators	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Actuators	6. 最初と最後の頁 51:1-51:15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/act12020051	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 Ryusei Uramune, Hiroki Ishizuka, Takefumi Hiraki, Yoshihiro Kawahara, Sei Ikeda, Osamu Oshiro	4. 巻 10
2. 論文標題 HaPouch: A Miniaturized, Soft, and Wearable Haptic Display Device Using a Liquid-to-Gas Phase Change Actuator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 16830 ~ 16842
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2022.3141385	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 Seiya Hirai, Tatsuho Nagatomo, Takefumi Hiraki, Hiroki Ishizuka, Yoshihiro Kawahara, Norihisa Miki	4. 巻 6(3)
2. 論文標題 Micro Elastic Pouch Motors: Elastically Deformable and Miniaturized Soft Actuators Using Liquid-to-Gas Phase Change	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 5373 ~ 5380
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2021.3075102	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 Tatsuya Usui, Hiroki Ishizuka, Takefumi Hiraki, Yoshihiro Kawahara, Sei Ikeda, Osamu Oshiro	4. 巻 60
2. 論文標題 Fully flexible liquid-to-gas phase change actuators with integrated liquid metal heaters	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SCCL11:1 ~ 10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/abec8d	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 3件）

1. 発表者名 Kazuki Yamaura and Takefumi Hiraki
2. 発表標題 Laser HaPouch: A Haptic Display Utilizing Selective Activation of Laser-powered Liquid-to-gas Phase Change Actuator Arrays
3. 学会等名 The 2023 IEEE World Haptics Conference (WHC 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山浦 一輝, 平木 剛史
2. 発表標題 液相-気相転移アクチュエータアレイの加熱による力覚ディスプレイの基礎検討
3. 学会等名 第27回 日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浦宗 龍生, 石塚 裕己, 平木 剛史, 川原 圭博, 池田 聖, 大城 理
2. 発表標題 高精度な力覚提示に向けた気液相変化アクチュエータの内圧計測法の検討
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021予稿集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryusei Uramune, Hiroki Ishizuka, Takefumi Hiraki, Yoshihiro Kawahara, Sei Ikeda, Osamu Oshiro
2. 発表標題 HaPouch: Soft and Wearable Haptic Display Devices using Liquid-to-gas Phase Change Actuator
3. 学会等名 The 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryusei Uramune, Hiroki Ishizuka, Takefumi Hiraki, Yoshihiro Kawahara, Sei Ikeda, Osamu Oshiro
2. 発表標題 Inflatable Soft Haptic Device using Liquid-to-gas Phase Change Actuator
3. 学会等名 The 12th International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications (EuroHaptics 2020) (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
---------	---------