

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H04882

研究課題名（和文）EHD流体制御に基づくやわらかいモノへの表現機能の埋め込みとインタラクション創出

研究課題名（英文）Embedding Expressive Functions into Soft Objects and Designing Interactions Based on EHD Fluid Control

研究代表者

寛 康明（Takehi, Yasuaki）

東京大学・大学院情報学環・学際情報学府・教授

研究者番号：40500202

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 32,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、Electrohydrodynamics（EHD、電気流体力学）の原理を用いて布のように柔らかさ・しなやかさを有するモノの中にアクチュエーションやディスプレイ機能を埋め込み、モノを介したマルチモーダルなインタラクションを実現することを目的とする。成果として、まずEHDポンプの原理のモデル化、低電圧駆動化を行い、さらにEHDによる流体制御のプロトタイピングのためのモジュール型デバイスを開発した。流体制御を通じたマルチモーダルなインタラクションとして、変形、温冷感覚、色彩変化などを制御できるシステムを開発し、ヒューマンインタフェースやアートインスタレーションとしての応用実装を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来から工学分野ではEHDアクチュエータの研究が行われてきたが、本研究の貢献の一つはその作りやすさや使いやすさを考慮したデザインが挙げられる。本手法で開発したデジタルアプリケーション機器の利用を想定したEHD回路の制作や無線での制御手法や、ユーザインタフェースとして流体制御を通じた騒音の少ないマルチモーダルなインタラクション手法は、ユーザや応用分野の広がりが期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we aim to embed actuation and display functions within objects that possess the softness and flexibility by utilizing the principles of Electrohydrodynamics (EHD). Our goal is to achieve multimodal interaction through these objects. As a result, we first modeled the principles of the EHD pump and made it operable at lower voltage. Furthermore, we developed a modular device for prototyping liquid control using EHD. Through liquid control, we created a system capable of controlling deformation, thermal sensations, and color changes, and we implemented applications for human interfaces and art installations.

研究分野：ヒューマン・コンピュータ・インタラクション

キーワード：Electrohydrodynamics 流体制御 マテリアルインタラクション フィジカルディスプレイ ソフトアクチュエータ プロトタイピング

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

本研究の背景として、HCI（Human-Computer Interaction）の領域で、Organic Interfaces や Radical Atoms、または Shape-Changing Interfaces（形状可変インタフェース）として議論されているフィジカルインタフェース研究の隆盛を挙げる。これらは、物理的な実体を持つオブジェクトの形状や色の特性や動きなどをプログラマブルに制御し、またそれらの特性変化を入力としても利用することにより、物体そのものをインタフェースとして実世界ベースの作業支援やコミュニケーション、身体拡張、表現などに役立てようという取り組みである。これらは物体にセンサやアクチュエーション、ディスプレイ機能を統合することで、視聴覚情報だけに留まらない、より直接的・身体的なインタラクションを可能にする点に特徴がある。その中で、物体が本来持っている柔らかさやしなやかさ、軽さなどの特徴やその使い勝手を損なうことなく、アクチュエーションやディスプレイ等の新たな機能を埋め込むためには硬い素材で構成される機械部品や電子部品を取り付けたり、大きな外部駆動装置を必要とすることがないアプローチが必要になる。また、動きと色など複数のモダリティ変化を同じ物体に組み込もうとするとそれぞれ異なる仕組みや機構を必要とするという課題があった。

2. 研究の目的

本研究では、布のように柔らかさ・しなやかさを有するモノの中にアクチュエーション（形・動きなどの変化）やディスプレイ（色などの変化）機能を埋め込み、モノを介したマルチモーダルなインタラクションを実現することを目的とする。特に Electrohydrodynamics（EHD、電気流体力学）の原理を用いて流体の動きを制御する技術を基盤とし、モノの表面あるいは内部に血管のように流路を張り巡らせることで、モノに対して変形、温冷感覚、色彩変化などを制御できる機能を付与し、新規なヒューマンインタフェースの創出を目指す。

3. 研究の方法

EHD を中心とする流体制御原理のモデル化、アクチュエータの実装とモノへの埋め込みのためのファブリケーション技術の研究を行った。また、流体をプログラマブルに制御するための電氣的・流体的回路設計を提案した。さらに、モノのなかにアクチュエータおよび回路を統合し、温冷・透明度・動き等のモノの振る舞いの制御と衣服などへの組み込みを念頭に置いた柔らかいフィジカルディスプレイおよびインタフェースとしての実装を行い、アートインスタレーション等の応用を行った。

4. 研究成果

(1) EHD のモデル化と低電圧駆動

我々は単純化したモデルから、体積密度当たりの発生力を最大化する電極対間距離 b は電極間距離 a と電極幅 c を用いて、 $b=2a+c$ で表した。この関係式を実験とシミュレーションと比較し、おおそ合致することを確認した。さらに、ファブリケーション技術の限界を調査することで、電極間距離 a は 0.5mm 、電極幅 c は 0.5mm に縮小させ、EHD のサイズの高出力密度化、低電圧化に成功した。

(2) EHD による流体回路プロトタイプングツールの開発

本研究では、液体を用いたインタフェースのプロトタイプング参入障壁を下げることを目的

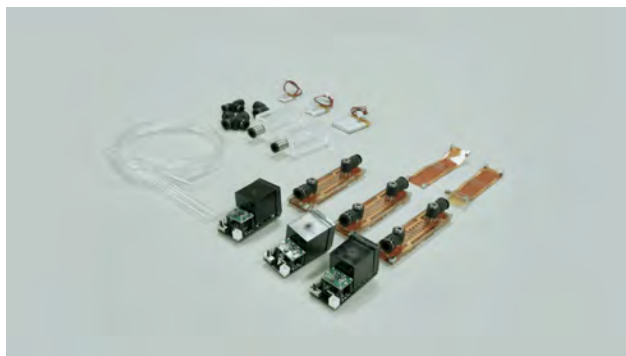


図 1: HydroMod

として、液体の流れを簡単に生成し、プログラムによって制御できるモジュールキット **HydroMod** を提案・実装した (図 1)。これは手のひらサイズの無線小型モジュールで構成されており、EHD ポンプによる液体の流れを発生させることができる。ユーザはモジュールを組み替えるだけで、流路を構成・制御することができる。本装置を用いて複数の EHD 回路の連動による流路の切替えなど、機械的部品を用いずに複雑な流体の挙動を制御する手法についても検討を行った。さらに、温冷が切り替わるウェアラブルデバイスや、ソフトアクチュエータ、液体による実体ディスプレイ等のアプリケーション提案を行なった。

また、EHD ポンプの試作および、形状多様性の向上に寄与する成果として、レーザーカッターやカッティングプロッタで任意の形や穴を切り出した板と EHD ポンプとして機能する電極を層状に積層させ接着・密封することで、短時間で所望の位置に立体的なポンプを内蔵するオブジェクトを試作できる **LayerPump** の研究を行った。

(3) EHD ポンプを用いたユーザ入力検出の研究

流路自体にセンシング機能を付与するために、EHD 流体へ外部圧力を加えた際に、楕型電極間に生じる微小電流の変化を取得し、圧力センサとして利用する手法提案および基礎検討を行い、実現の見通しを得た。EHD ポンプのインタフェース応用に向けて、流量の自己検知機能を持つ EHD ポンプを開発した。EHD ポンプでは、EHD 流によるイオン濃度分布の不均一性から、イオンが濃い領域から薄い領域へ移動し、拡散電流が発生する。また、移流拡散方程式から拡散電流は流量の $1/3$ 乗に比例する。本研究ではこの関係を用いて、自己検知 EHD ポンプのメカニズム、モデル、性能を明らかにするとともに、実装に向けてワイヤレス、ポケットサイズの熱制御システムを構築し有用性を実証した。

(4) EHD を用いたマルチモーダルな情報提示とインタラクション

一つは、EHD による液体の適量供給と小型ペルチェ素子による加熱制御による、小型で静音なパウチの膨張・収縮を用いたインタフェース **InflatableMod** を開発した (図 2)。このモジュールは、必要な低沸点液体の量をパウチに供給する液体伝達機能と、パウチを膨張させるための加熱機能を備えている。これによりコンパクトで静音、かつ有線にとられないインフレーターシステムが可能となる。また、各モジュールは無線で同期でき、再構成可能なマルチインフレーターシステムを作成することができる。設計・実装と共に、ソフトロボット、形状ディスプレイ、照明などインタフェースとしての応用を示した。

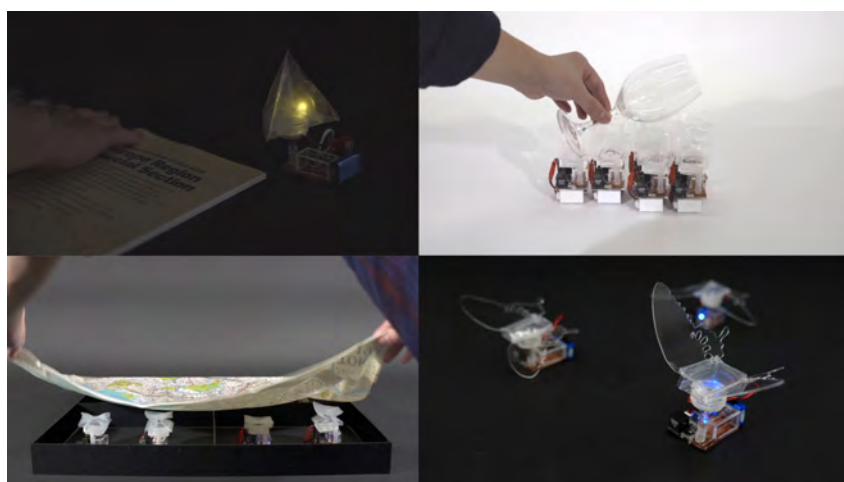


図 2: InflatableMod

二つ目は、EHD による液体攪拌を用いて、立体物の動的な透明度制御手法を提案・実装した (図 3)。液体の混合比率による透明度変化の違いなどを明らかにし、3D プリンタ等を用いて造形した立体に内蔵可能な装置設計に取り組んだ。



図 3: EHD による透明度制御の様子

三つ目は、EHD を用いて物体内部での液体(重心)位置を制御し、物体の傾きを変える機構を設計・実装した (図 4)。この機構を複数台並べ同期駆動した装置を作品として Ars Electronica Festival 2022 に出展し展示を行った。観客の反応を得るとともに、長期の展示を通して装置の耐久性を確かめた。

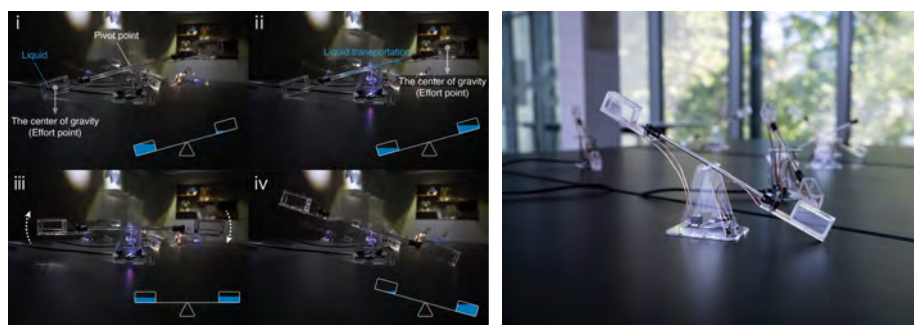


図 4: see-saw

(5) EHD を用いたディスプレイの実装: 従来の EHD では透明な誘電性液体のみが用いられることが多く、着色が課題であった。本研究では、複数の EHD ポンプの同期制御による流路内での色水の搬送を行い、色水と透明液体をそれぞれ個別に制御することで柔軟なチューブ内に色のパターンを構成・移動させる装置を実現した (図 5)。固い機械的素子を用いずに色水と透明液体を切り替えるための流路形状設計を行い、展示など長時間の安定した動作を実現した。これは、本研究で目的に掲げた布のように柔らかさ・しなやかさを有するモノの中にディスプレイ機能を埋め込む基盤技術として利用できる。

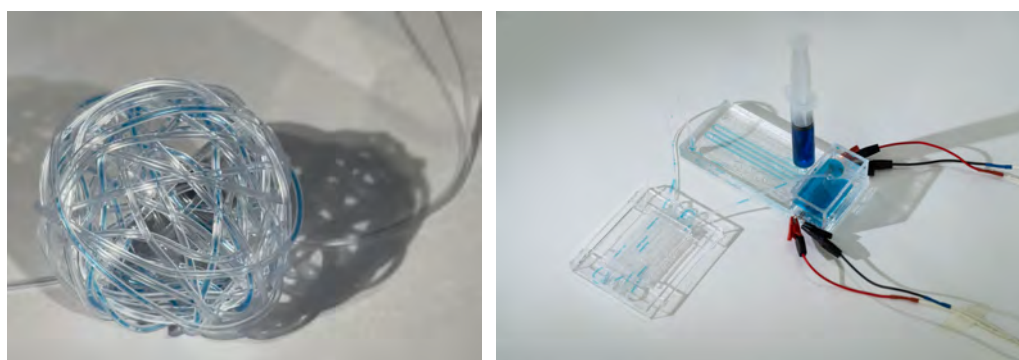


図 5: Liquibits

(6) その他の成果

EHD に加えて、ものの表面や液面を電氣的に制御する手法についての研究を行なった。

- 導電性印刷技術による液滴制御: 紙やフィルムなどのしなやかな支持体への導電印刷回路を用いて、Electrowetting による液滴の挙動や位置を制御する手法について基礎検討を行なった。提案手法は特に 5cm を超える電極間距離があっても、その中間で液滴が移動する点が特徴である。電極間距離と液滴の挙動に関する評価実験を行うと共に、作品展示を実施した。

- 超音波を用いた 2.5 次元的液面形状制御: 容器の裏面から超音波振動を加えることで、容器内の水面にドット状のパターンを作る技術開発に取り組んだ。容器の内部にデバイスを設置する必要がないことから、実装の容易さやインタフェース等への用途の広さに特徴がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 藤井 樹里, 中丸 啓, 笥 康明	4. 巻 26 巻 4 号
2. 論文標題 LayerPump: Electrohydrodynamicsポンプを内蔵した積層型3Dオブジェクトの設計手法とファブリケーション	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本バーチャルリアリティ学会論文誌	6. 最初と最後の頁 345-354
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18974/tvrsj.26.4_345	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 Ku wajima Yu, Yamaguchi Yuya, Yamada Yuhei, Morita Takafumi, Wiranata Ardi, Minaminosono Ayato, Hosoya Naoki, Kakehi Yasuaki, Maeda Shingo	4. 巻 16
2. 論文標題 Pocketable and Smart Electrohydrodynamic Pump for Clothes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Applied Materials & Interfaces	6. 最初と最後の頁 1883 ~ 1891
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsami.3c15274	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

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Takafumi Morita, Yu Ku wajima, Ayato Minaminosono, Shingo Maeda, and Yasuaki Kakehi
2. 発表標題 HydroMod: Constructive Modules for Prototyping Hydraulic Physical Interfaces
3. 学会等名 the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI ' 22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takafumi Morita, Yu Ku wajima, Ayato Minaminosono, Shingo Maeda, and Yasuaki Kakehi
2. 発表標題 Demonstrating HydroMod: Constructive Modules for Prototyping Hydraulic Physical Interfaces
3. 学会等名 Extended Abstracts of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA ' 22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ziyuan Jiang, Takafumi Morita, Kanon Aoyama, Yu Kuwajima, Naoki Hosoya, Shingo Maeda, and Yasuaki Kakehi
2. 発表標題 A Method for Controlling the Continuous Transparency of Three-dimensional Objects Utilizing Mechanical Emulsification
3. 学会等名 the Seventeenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '23) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takafumi Morita, Ziyuan Jiang, Kanon Aoyama, Ayato Minaminosono, Yu Kuwajima, Naoki Hosoya, Shingo Maeda, and Yasuaki Kakehi
2. 発表標題 InflatableMod: Untethered and Reconfigurable Inflatable Modules for Tabletop-sized Pneumatic Physical Interfaces.
3. 学会等名 the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '23) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takafumi Morita, Ziyuan Jiang, Kanon Aoyama, Ayato Minaminosono, Yu Kuwajima, Naoki Hosoya, Shingo Maeda, and Yasuaki Kakehi
2. 発表標題 Demonstrating InflatableMod: Untethered and Reconfigurable Inflatable Modules for Tabletop-sized Pneumatic Physical Interfaces.
3. 学会等名 Extended Abstracts of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '23) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takafumi Morita and Yasuaki Kakehi
2. 発表標題 see-saw
3. 学会等名 Ars Electronica Festival 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshimori Yoshikawa, Takafumi Morita, Daiki Shiota, Eiji Iwase, and Yasuaki Kakehi
2. 発表標題 ChoreoDrops: Manipulation of Water Droplets Using Conductive Line Patterns Sparsely Printed on Paper
3. 学会等名 In Proceedings of the Eighteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '24). Association for Computing Machinery (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Takafumi Morita and Yasuaki Kakehi
2. 発表標題 see-saw: A Kinetic Installation that Unfolds in Silence Driven by Liquid Flow
3. 学会等名 In SIGGRAPH Asia 2023 Art Papers (SA '23) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 瀬川空矢、桑島悠、毛澤兵、細矢直基、前田真吾
2. 発表標題 EHDポンプを用いたリニアパウチアクチュエータ
3. 学会等名 ROBOMECH2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshimori Yoshikawa, Eiji Iwase, Yasuaki Kakehi
2. 発表標題 ChoreoDrops
3. 学会等名 Ars Electronica Festival 2023 Gardens Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kuan-Ju Wu, 開元宏樹、笈康明
2. 発表標題 Signs of Water
3. 学会等名 いちかわ芸術祭（招待展示）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 笈康明	4. 発行年 2024年
2. 出版社 コロナ社	5. 総ページ数 47
3. 書名 デジタルファブリケーションとメディア（第3章「インタラクティブなものづくり」を執筆）	

〔産業財産権〕

〔その他〕

HydroMod https://xlab.iii.u-tokyo.ac.jp/projects/hydromod/ InflatableMod https://xlab.iii.u-tokyo.ac.jp/projects/inflatablemod/ LayerPump https://xlab.iii.u-tokyo.ac.jp/projects/layerpump/

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
研究分担者	前田 真吾 (Maeda Shingo) (40424808)	東京工業大学・工学院・教授 (12608)	

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