

# RippleSpike: スパイク表現と波紋表現を組み合わせた情報提示手法

野間 直生\* 沖 真帆\* 塚田 浩二\*

**概要.** 液体ディスプレイには、柔軟な形状変化や液体の質感を活用できるといった特徴がある。本研究では、液体の中でも磁力によって容易に制御が可能な磁性流体に着目した。磁性流体とは、強磁性の粉末を分散させたコロイド溶液であり、強力な磁力を印加することでスパイク状に隆起する。このスパイク表現はメディアアート等で広く活用されており、強い存在感を持つ。そこで本研究では、磁性流体にオイルを混合させることで、棘のようなテクスチャを抑制し、なだらかな半球や余韻を表現して、スパイク表現と組み合わせて利用する。本稿では、スパイク表現となだらかな波紋表現を組み合わせた情報提示手法「RippleSpike」の提案、実装、性能評価、表現事例と応用例について述べる。

## 1 はじめに

近年、液体を用いた情報表現手法が盛んに提案されている。例えば、バブルディスプレイ [13] は水中の気泡を利用し、水の時計 [11] は水滴の間隔を調整することで、情報提示を行う。こうした液体ディスプレイは、柔軟な形状変化や液体の質感を活用できるといった特徴がある。特に印象的な表現を行える素材として、磁性流体が知られている。磁性流体とは、強磁性粒子、溶媒、界面活性剤から成り立つコロイド溶液である。磁場の影響を受けて形状が変化する特性を持ち、磁石を近づけるとスパイク現象が発生して、磁場の方向に沿って棘のような隆起の集合体が形成される (図1左)。隆起の密度や数、大きさは磁力の強さや位置に応じて変化するため、電磁石等を用いた制御により動的に形状を変更するメディアアート作品等に活用されている [12]。このようにスパイク表現は印象的な効果を生む一方で、視覚的な存在感が強く、アンビエント・ディスプレイのようなさりげない情報提示には活用が難しかった。磁性流体でさりげない情報提示を行う手法を確立できれば、スパイク表現と組み合わせて、存在感や誘目性をなめらかに調整可能な情報提示手法として活用できる可能性がある。そこで本研究では、磁性流体にオイルを混合し、磁力の制御方法を工夫することで、なだらかな半球や余韻を表現し (図1右)、スパイク表現と組み合わせ可能な情報提示手法「RippleSpike」を提案する。本稿では、RippleSpike のコンセプト、実装、性能評価、表現事例と応用例について述べ、適切なオイル混合率や電磁石の制御方法について報告する。

なお、本稿は、インタラクション 2024 のデモ発表 [14] と HCI 研究会で発表 [15] した内容を元に整理した。

Copyright is held by the author(s).

\* 公立はこだて未来大学

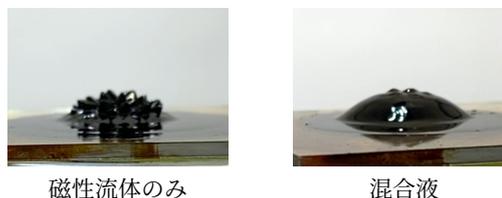


図 1. 磁性流体に磁力を印加した様子

## 2 関連研究

本研究の関連研究を「アンビエント・ディスプレイ」、「液体を用いた表現手法」、「磁性体を用いた表現手法」の3つの視点から紹介する。

### 2.1 アンビエント・ディスプレイ

Tangible Bits[3]では、実世界でのインタフェースの1つとして、周辺視野などの人間の知覚の周辺に設置する Ambient media を提案している。Ambient media は、人間が常に周辺環境から様々な情報を得ていることに着目し、音や光、空気の流れなどを利用することで、ユーザが注意を向けていなくても情報を気軽に受け取ることができる。Wisneskiら [8] は、アンビエント・ディスプレイとして AmbientRoom と Pinwheels を提案している。AmbientRoom は壁への投影や環境音、光の揺れなどを Ambient media として用いている。Pinwheels は、株価等の多様なデジタル情報を風車の回転速度を用いて表現する手法である。本研究では、磁性流体を用いて、存在感のあるスパイク表現だけでなく、さりげない波紋表現も組み合わせたアンビエント・ディスプレイの応用例を作成する。

### 2.2 液体を用いた表現手法

Coworo[4]は、攪拌によって液体表面が隆起する液体に着目したメディアアートである。電子制御によって、任意の位置、高さで隆起を発生させること



図 2. 本提案で作成可能な表現例

ができる。BubBowl[1]は、電気分解により発生する泡を画素とすることで、水面をドットマトリクスディスプレイのように活用できる。具体的には、インスタントコーヒー、コーンスターチ、炭酸水素ナトリウムを混ぜた黒い電解液を用いて、動的に変化する表現事例を提示している。また、Bubble Mirror[2]は、BubBowlの応用研究であり、水面を覗き込むことで鑑賞者の顔が泡で表示される作品等を提案している。Tangible Drops[6]は、水酸化ナトリウム中に浮かべた液状のガリウムを画素として用いるディスプレイである。任意の位置に液状のガリウムを移動させることで、視覚・触覚フィードバックを実現している。本研究では、なだらかな半球とスパイク表現、および高速に振幅する波紋表現等を組み合わせた多様な液体表現の構築を目指す。

### 2.3 磁性体を用いた表現手法

Astral Body[10]はテーブル上に広げた砂鉄を磁石を用いて制御することで、生き物の動きを再現したメディアアートである。Millefiori[5]は磁性流体の「ラビリンス不安定性」という、狭い空間に密閉した際に発生する複雑なパターンを利用したメディアアートである。水彩絵の具と磁性流体の混合液を用いることで色彩豊かな表現を行なっている。本研究では、磁性流体にオイルを混合したり、制御方法を工夫することで、スパイク現象に加えて、なだらかな半球や余韻を表現する手法を提案する。

中野ら[9][16]はスライム状の磁性体を作成し、永久磁石で操作する手法を提案している。磁石を操作することで、磁性体の移動／伸縮、合成／分離などの動作が可能である。Slime Robot[7]は粘弾性のある液体状のロボットである。変形や移動に加えて、液体が導電性であることを活用し、電子回路を修復する事例を提案している。本研究では、なだらかな表現やスパイク表現を組み合わせた情報提示手法を開発する。

## 3 提案

### 3.1 コンセプト

本研究では、磁性流体にオイルを混合することで、磁性流体の表現を拡張し、スパイク現象に加えて、なだらかな半球や余韻を表現する。また、作成した表現を用いた情報提示手法「RippleSpike」を提案する(図2)。RippleSpikeのコンセプトは、大きく以下の2点である。

1. スパイク表現となだらかな半球表現の融合
2. 生活空間での利用

一点目は、スパイク現象に加えて、なだらかな半球や余韻を表現することである。こうした表現を行うためには、磁性流体の粘度を下げることで、スパイク状の隆起を抑えたり、応答性を高める。二点目は、システムを生活空間で長期的に利用できるよう、構成をシンプルにしたり、磁性流体の漏れや揮発を防ぐ工夫を行うことである。

### 3.2 デバイス構成

生活空間での利用を見据えて、図3のように設置や運用が容易なシンプルなデバイス構成を取る。

#### 格納部

磁性流体は直接触ることができず、また布などに付着すると微小な粒子が沈着してしまうため、密閉する必要がある。そこで、格納部となるトレイと液漏れ対策を施した蓋を製作する。

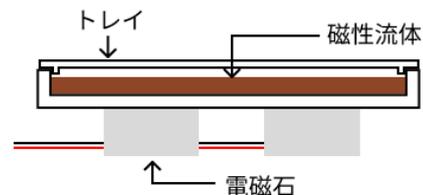


図 3. 基本のデバイス構成

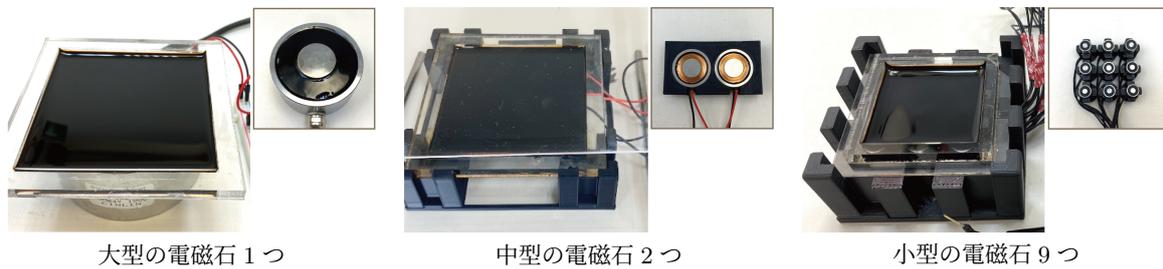


図 4. プロトタイプ

## 電磁石アレイ

格納部の下部には電磁石アレイを設置する。電磁石アレイは筐体に固定されており、安定して格納部を支えつつ、交換もできるように工夫する。様々なサイズ/数の電磁石アレイを用意することで、多様な表現を検討する。

## センシング

基本的な表現にセンサは利用しないが、後述する応用例等を想定して、センサを取り付け可能な設計とする。具体的には、会話を検出するマイク、人の存在を検出する距離センサ等を検討する。さらに、センサの脱着が容易で拡張性のある構造を目指す。

## 4 実装

本章では、RippleSpikeのプロトタイプについて説明する。プロトタイプは大きく、「磁性流体の格納部」「電磁石アレイ」「制御基板」を中心に構成される。以下、オイルの混合と、プロトタイプ各部の詳細を示す。図4は作成した3種類のプロトタイプである。それぞれ、電磁石アレイの筐体に格納トレイ（蓋無し）を設置している。プロトタイプを用いて、混合液の動作確認と表現の模索を行った。

### 4.1 オイルの混合

なだらかな半球や余韻を表現するために、本研究では磁性流体にミネラルオイルを混合する。ミネラルオイルの、「粘度が低い」「揮発しにくい」「劣化しにくい」といった特性に着目する。磁性流体にはシグマハイケミカルのDS-50を、ミネラルオイルにはジョンソンのベビーオイルを用いた。図1はそれぞれ、磁性流体のみと混合液に下部から永久磁石を用いて磁力を印加している様子である。オイルを混合することで、図1右のように、スパイクを抑制する効果や、応答性能が向上する傾向があった。さらに、磁性流体の揮発を防止する効果も見られた。

### 4.2 磁性流体の格納部

磁性流体はシャーレのような薄型のトレイに格納する。プロトタイプでは、100mm×100mmのケースと50mm×50mmのトレイを作成した。磁性流体の動きを観察しやすいように、トレイは透明の亚克力板をレーザーカッターで加工し、液体が漏れないよう慎重に接着した。また、磁性流体は人体に有害であるため、直接触れたり、液漏れしたりする状況を避ける必要がある。そこで、磁性流体の格納トレイにはパッキンを付けた透明の蓋を用意した。パッキンはエラストックレジンをを用いて光造形式の3Dプリンタで自作し、蓋の内側のガイドに沿って接着した。

### 4.3 電磁石アレイ

多様な表現を試行するために、3種類の電磁石アレイを用意した。筐体のサイズを揃えるために、大型の電磁石（直径80mm、磁力55mT）は1つ、中型の電磁石（直径26mm、磁力29mT）は2つ、小型の電磁石（直径8mm、磁力23mT）は9つを同時に制御可能な設計とした。磁力はそれぞれ24Vを印加したとき、ガウスメーターで計測した実測値である。それぞれの電磁石に合わせて筐体を設計し、格納トレイを固定できるように配慮した。図4の各プロトタイプの右上に、使用した電磁石を示す。

### 4.4 制御基板

電磁石を制御するための制御回路と基板について述べる。電磁石毎に1つのFET(K4017)を利用しており、マイコン(Arduino pro mini)から制御する。基板はEagleで独自に設計した(図5)。1枚の基板に6つのFETを備えており、最大6個の電磁石を制御できる。JSTコネクタやオーディオプラグを用いることで、手軽に交換できるように設計した。さらに、基板同士をI<sup>2</sup>Cを介して接続できるように設計しており、n枚の基板を連結することで、n×6個の電磁石を同時に制御できる。同様の方法で、センサを制御する基板も拡張できる仕様とした。



JST コネクタ (NSH)

オーディオプラグ

図 5. 基板の外観

## 5 性能評価

本章では、主にオイルの混合率に応じた外観や応答性の変化について述べる。

### 5.1 オイルの混合による外観の変化

#### 5.1.1 目的と手法

本研究では、スパイク表現となだらかな半球表現の両立を目指す。そこで、2種類の表現が両立可能なオイルの混合割合を調査した。大型の電磁石に0mT～90mTの間で10mT毎に磁力を印加し、混合液の様子を観察した。混合液は表1の6種類の比率で用意した。磁力はガウスメーターを用いて最も磁力が強い位置を計測した。

表 1. 混合液の比率

混合液	磁性流体 (%)	オイル (%)
A	100	0
B	90	10
C	67	33
D	50	50
E	33	67
F	25	75

#### 5.1.2 結果と考察

実験結果のうち、特に差が見られた部分を図6に示す。混合液A(100:0)では50mT～90mTにおいて、混合液B(90:10)では60mT～90mTにおいてスパイク現象が見られた。混合液C(67:33)では90mTでもスパイク現象が確認できなかった。これらのことから、オイルを混ぜることでスパイク現象がかなり抑制されることがわかった。また、混合液のオイルの割合を10%にすることで、スパイクが発生せずになだらかな半球表現が行える磁力(≒PWM値)の範囲を広く取ることができ、多様な表現を制御しやすいと考えた。

### 5.2 オイルの混合による反応速度の比較

#### 5.2.1 目的と手法

応答性を定量的に確認するため、オイルの混合による反応速度の変化を調査した。8mmの電磁石を

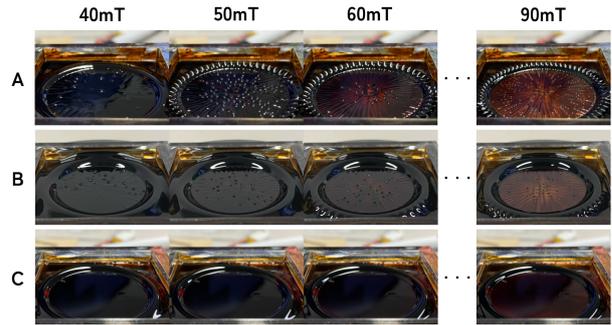


図 6. スパイク現象の変化

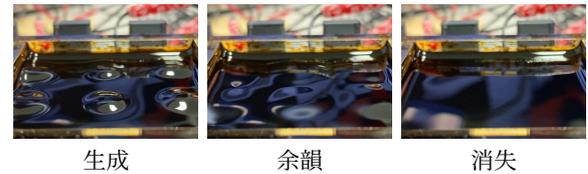


図 7. 反応速度調査の様子

9つ用いて、2秒間100%/8秒間0%の2値制御を行った。2値制御を行うことで、図7のような生成/余韻/消失と遷移する様子が観察される。

磁力を100%印加するとなだらかな半球の生成が始まる。生成の開始から半球が大きくなりきったところまでを「生成にかかった時間」とする。次に、磁力の印加を100%の状態から0%に急激に変化させることで、余韻の表現が見られる。余韻の開始から、水面が平らになるまでの時間を「消失にかかった時間」とする。

混合液の様子を斜め上から30fpsで撮影し、生成/消失にかかった時間を動画編集ソフト(final cut pro)を用いて目視で確認した。電磁石の出力と同時にLEDを点灯させることで、磁力の印加/停止のタイミングを判別した。

#### 5.2.2 結果と考察

表2は半球の生成/消失にかかった時間を示す。混合液D(50:50)が最も生成に必要な時間が短く、割合が偏ることで生成が終わるまでの時間がやや長くなる傾向が見られた。消失では、混合液A(100:0)が最も消失に必要な時間が長く、オイルの混合割合を増加させることで時間が短縮する傾向が見られた。

消失にかかる時間は、AとBの差は少ないが、C以降は大幅に短くなり、「余韻」の表現が難しくなる。5.1.2の結果と併せて考えると、Bの混合液(オイル10%)のバランスが良いと考えたため、応用例等で利用した。

表 2. 半球の生成時間と消失時間

混合液の番号	生成 (s)	消失 (s)
A	1.55	6.29
B	1.56	5.50
C	1.16	3.49
D	1.04	1.17
E	1.52	1.00
F	1.49	0.56

## 6 表現事例と応用例

### 6.1 表現事例

提案手法は大別して、なだらかな半球、スパイク、余韻の3種類の表現を行うことができる(図2)。具体的な制御方法と表現事例を併せて紹介する。

#### 6.1.1 PWM値と表現例

PWMの出力値(割合)を時間経過に合わせて制御することで、(1)2値制御、(2)連続制御、(3)振幅制御の3種類の表現事例を作成した(図8)。筐体には、中型の電磁石と磁性流体75%/ミネラルオイル25%の混合液を用いている。この混合率の混合液では、PWM値100%であっても、スパイク表現は見られない。

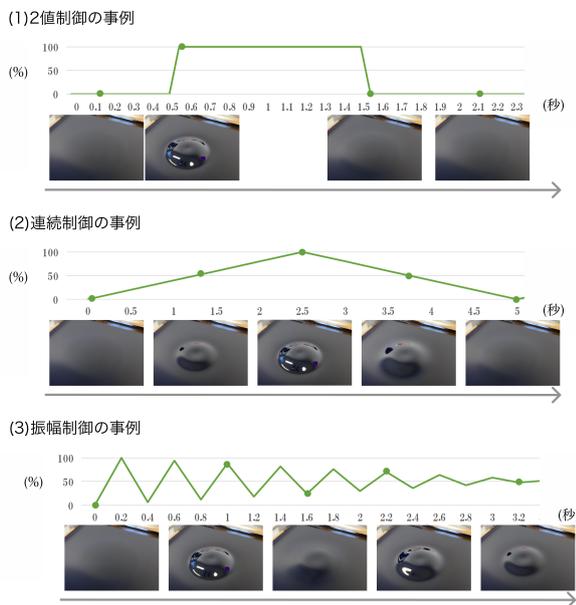


図 8. 基本的な表現事例

(1)は、PWM値で0%/100%の2値制御の事例である(図8(1))。100%にした直後(0.5秒)で半球が生じており、0%にした直後(1.5秒)にはゆっくり波が引く余韻の表現が見られた。

(2)は、PWM値を0~100%まで約2.5秒かけて

連続的に上昇させ、その後同様に100~0%まで下降させた事例である(図8(2))。

(3)は、振幅を徐々に小さくしながら、連続的に繰り返した事例である(図8(3))。周期は約0.4秒で固定した。PWM値に連動して、半球が高速に振動しながら徐々に落ち着いていく表現が観察できた。

また、上記の表現とスパイク表現を組み合わせて、(4)水跳ね、(5)ツノの2種類の表現を作成した(図9)。筐体には、大型の電磁石と磁性流体90%/ミネラルオイル10%の混合液を用いた。

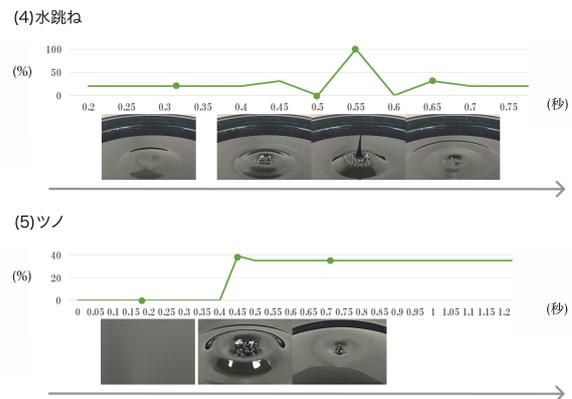


図 9. 複合的な表現事例

(4)は、水が跳ねている様子を参考に表現した事例である(図9(4))。約0.1秒の間に25%の出力から35%まで上昇させ、0%まで出力を下げる。次に、同様に約0.1秒で0%から100%まで出力を上げ、0%まで出力を低下させ、最初と同様に35%の出力を行った。一瞬ではあるが、混合液が飛び跳ねる様子が観察でき、スパイク/余韻共に刹那的な表現が見られた。予備動作を付随させることで、より激しく混合液が動いたと考えられる。

(5)は、スパイクの数を磁力によって調整し、一本のみスパイクを作成することで、ツノのように見せる事例である(図9(5))。0%の状態から、約0.1秒で40%の出力を行い、38%まで出力を低下させた。

#### 6.1.2 状態遷移

6.1.1節の知見に基づいて、RippleSpikeを用いた表現の状態遷移を図10に整理した。ここでは、磁性流体90%とミネラルオイル10%の混合液を対象とする。磁力を印加していない初期の状態(PWM値: 0%)から、一定の磁力を印加(PWM値: 30%)することでなだらかな半球が生成される。より強い磁力(PWM値: 100%)を印加することで、初期の状態からスパイクに遷移する。なだらかな半球/スパイクから、瞬時に磁力の印加を止める(PWM値: 0%)ことで、余韻が生成されてから初期状態に戻る。

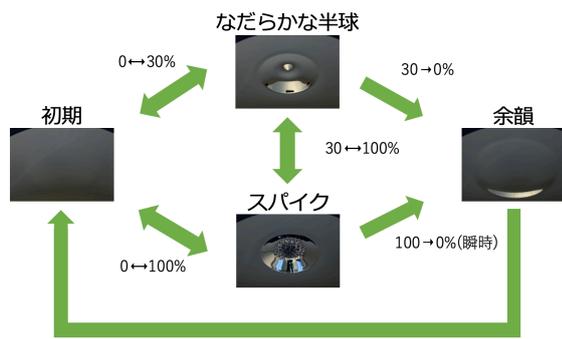


図 10. 磁力の変化による遷移図

## 6.2 応用例

会議室やホール等に設置してアンビエント・ディスプレイのように活用することを想定して、直径80mmの大型電磁石を5つ用いた大型筐体を実装した(図11)。磁性流体の格納ケースの直径は260mmであり、数メートル程度離れた距離からも容易に挙動を観察することができる。また、マイクや距離センサを取り付け/交換可能な仕組みも備えている。

また、ユーザが生活する場所に設置しやすいように、大型の電磁石一つを円柱状の筐体に組み込んだ卓上デバイスを作成した(図13)。

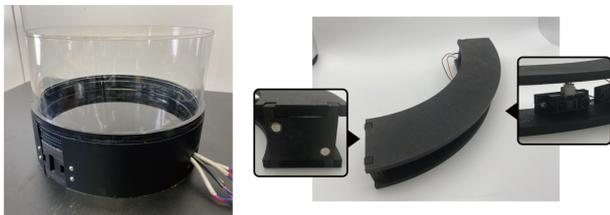


図 11. 大型筐体の外観(左)とセンサ類の交換機構(右)

### 6.2.1 会話量の可視化

複数人の会話に応じて表現が変化する事例を紹介する。会話の可視化では、大型筐体を用いる。指向性マイクを複数用いて、会話の音量と方向をセンシングし、なだらかな半球やスパイクを用いて表現する。静かな声で会話が行われている時は、静かに半球が生成と消失を繰り返す(図12左)。会話が白熱したり、感情的になることで、スパイクが出現し、白熱している様子を表現する(図12右)。筐体を中央に設置し、会議の様子を可視化することで、さりげなく発話量の調整や、会話の温度感の調整ができると考えている。

### 6.2.2 植物の土壌水分量の可視化

観葉植物の土壌の水分量を可視化する事例を紹介する。鉢に取り付けた自作水分量センサを用いて、

土壌の水分量のセンシングを行い、水分量に応じて卓上デバイス上で表現を行う。例えば、徐々に土壌の水分量が不足してくると、ツノが生成/消失を繰り返す、水が足りていないことをユーザに伝える(図13左)。水を与えるとスパイクの表現を用いて水が十分に足りている様子を伝える(図13右)。



落ち着いた発話

白熱した発話

図 12. 会話の可視化の表現例



水が足りていない

水が足りている

図 13. 植物の状態可視化の表現例

## 7 まとめと展望

本研究では、磁性流体にオイルを混合させ、制御方法を工夫することで、スパイク現象に加えて、なだらかな半球や余韻を表現する手法を提案した。さらに、これらの表現手法を組み合わせた情報提示手法「RippleSpike」を構築した。また、性能評価を通して、システムの応答性や表現力を調査した。

今後の展望として、電磁石の角度や配置を調整し、電磁石から発生する磁力同士を干渉させることで、より複雑で多彩な表現を作成することができる可能性がある。例えば、本提案では磁場を垂直に印加しているが、水平に印加することで、楕円状の半球が生成される。また、現状の亚克力を利用した天板は、光の反射によって視認性が損なわれてしまう。具体的な解決策として、低反射ガラスを使用することで、光の反射を防ぐことができると考える。

### 謝辞

本研究の一部は、科研費 20H04231 の支援を受けた。

### 参考文献

- [1] A. Ishii and I. Siio. BubBowl: Display Vessel Using Electrolysis Bubbles in Drinkable Beverages. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, p. 619–623, New

- York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [2] A. Ishii, N. Tanaka, and I. Sii. Bubble Mirror: An Interactive Face Image Display Using Electrolysis Bubbles. In *SIGGRAPH Asia 2020 Emerging Technologies*, SA '20, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [3] H. Ishii and B. Ullmer. Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '97, p. 234–241, New York, NY, USA, 1997. Association for Computing Machinery.
- [4] T. Matsunobu and Y. Kakehi. Coworo: a kinetic installation with shape-changing liquid. <https://xlab.iii.u-tokyo.ac.jp/projects/coworo/>, 2018.
- [5] F. Oefner. Millefiori. <https://www.behance.net/gallery/4036035/Millefiori>.
- [6] D. R. Sahoo, T. Neate, Y. Tokuda, J. Pearson, S. Robinson, S. Subramanian, and M. Jones. Tangible Drops: A Visio-Tactile Display Using Actuated Liquid-Metal Droplets. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, p. 1–14, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [7] M. Sun, C. Tian, L. Mao, X. Meng, X. Shen, B. Hao, X. Wang, H. Xie, and L. Zhang. Reconfigurable Magnetic Slime Robot: Deformation, Adaptability, and Multifunction. *Advanced Functional Materials*, 32, 2022.
- [8] C. Wisneski, H. Ishii, A. Dahley, M. Gorbet, S. Brave, B. Ullmer, and P. Yarin. Ambient Displays: Turning Architectural Space into an Interface between People and Digital Information. pp. 22–32, 02 1998.
- [9] 中野 亜希人, 脇田 玲. 磁性ゲル形状ディスプレイの開発とインタラクショナル手法の検討. 情報処理学会論文誌, 54(4):1528–1537, 04 2013.
- [10] 山本 景子, 長沼 大樹, 油井 俊哉, 原田 誠史, 福谷 和芳, 堀 修生, 福澤 貴之. Astral Body : 強磁性粉末を用いた動的なディスプレイによる生き物らしさの表現. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 24(3):313–323, 2019.
- [11] 光栄. JR 大阪駅「水の時計」. <http://www.koeiaquatec.co.jp/works/detail/jrosakamizutokei.html>, 2011.
- [12] 児玉 幸子, 宮島 靖. 音楽に同期する磁性流体彫刻 (「アート & エンタテインメント」特集). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 12(3):247–257, 2007.
- [13] 佐川 俊介, 小川 剛史. バブルディスプレイ: 水中の気泡を用いたインタラクティブ映像システム. 情報処理学会論文誌デジタルコンテンツ (DCON), 2(1):16–23, 02 2014.
- [14] 野間 直生, 塚田 浩二. RippleSpike: スパイク表現と波紋表現を組み合わせたアンビエントディスプレイ. 情報処理学会 インタラクショナル 2024 論文集, pp. 433–438, 2024.
- [15] 野間 直生, 塚田 浩二. RippleSpike: スパイク表現と波紋表現を組み合わせたアンビエントディスプレイの試作と評価. 情報処理学会研究報告, 2024-HCI-207(13), pp. 1–8, 2024.
- [16] 脇田 玲, 中野 亜希人. Rheologic Interaction : 流動的プログラマブルマターを用いたインタラクショナルデザインの試み. 情報処理学会研究報告, 2010 年度 (4):1–5, 12 2010.