

電気分解気泡表示のアートへの応用

石井綾郁¹⁾(正会員) 福島真花¹⁾(非会員) 田中波輝¹⁾(非会員)
的場やすし¹⁾(非会員) 池松香²⁾(非会員) 椎尾一郎¹⁾(非会員)

1) お茶の水女子大学 2) ヤフー株式会社

Approach to Interactive Art by Electrolysis Bubble Display Mechanism

Ayaka Ishii¹⁾ Manaka Fukushima¹⁾ Namiki Tanaka¹⁾
Yasushi Matoba¹⁾ Kaori Ikematsu²⁾ Itiro Siio¹⁾

1) Ochanomizu University 2) Yahoo Japan Corporation

概要

電気分解により発生する気泡を画素として用いる情報表示手法が筆者らにより提案されている [1]。この研究の提案手法は、日常的な情報表示装置として利用されることが想定されていた。一方で、泡は消えやすく儂い性質を持っており、インタラクティブなアートやエンターテインメント作品のための素材としても有望であると考えられる。しかし、従来の電気分解気泡表示は応答速度が低く、低画素のバイナリ表示であるため、表現の可能性が制限されていた。本研究ではこの課題を解決し、アート作品への応用を模索する 2 点の気泡表示デバイスを開発する。1 点目は、流れる水面にティックカー状の泡表示を行う“UTAKATA”である。水路の底面に電極を直線状に配置し電気分解を行うことで、泡によるメッセージを水路の下流に向かって流しながら動的に表示する。2 点目は、水盤に対面したユーザの顔を水面に泡で表示する鏡のようなディスプレイ“Bubble Mirror”である。これは、32×32 個の電極を用いて、8 段階のグレースケールの泡による顔画像を水面に表示する。本稿ではこれらのデバイスの実装と表示性能の評価について報告する。

Abstract

Research was conducted on an electrolysis bubble display intended to be used as an everyday information display device [1]. In contrast, we intuitively assume that the bubbles also hold potential as a method for interactive artwork because of their ephemeral nature. However, the conventional electrolysis bubble display has a low response time and can only realize a low-pixel binary display, limiting the range of expression. This research addresses this challenge and presents two bubble display devices to explore applications to artwork. First, we present “UTAKATA,” a ticker-like bubble display, using a running-water channel. Seven electrodes are placed linearly on the channel bed, and they generate text messages using drifting bubble dots. Second, we present the “Bubble Mirror,” a water pan with a camera that captures a visitor’s face and displays it using electrolysis bubbles. Facial images with eight grayscale levels are displayed on the water surface using 32 × 32 electrodes.

1 はじめに

水は我々の生活に不可欠であり、日々の生活を豊かにする。人々は古来より河川の流れや池の水面にうつる景色を見て楽しんできた。一方で、水だけでなく、水流の表面に浮かぶ泡も躍動的な景観を形成する重要な要素である。鴨長明が方丈記^{*1}で述べたように、流れる水やそれに浮かぶ泡はとどまることなく変化していくため、無常のメタファとして多くの文学作品に登場してきた。近年、水泡により文字や画像を表示する手法がいくつか提案されている。例えば、電気分解により発生する気泡を画素として用い、水面に情報表示を行うディスプレイが提案されている [1]。このディスプレイを用いることで、飲料表面に 10×10 のドットマトリクスパターンを動的に表示することが可能である。この研究の提案手法は、日常的な情報表示装置として利用されることが想定されてきた。一方で、前述のとおり泡は儂い性質を持ち、作品の表現手法としてしばしば用いられる。そこで我々は、この泡がインタラクティブなアートやエンターテインメント作品のための素材としても有用であると考えた。

しかし、従来の電気分解気泡表示の機構は、泡表示の消去に 1 分程度必要であり、100 画素のバイナリ表示しか実現できなかった。このため、動的な表現に不向きであり、表現能力に乏しかった。そこで、本研究ではこれらの課題を解決し、アート作品等への応用を模索する 2 点の気泡表示デバイスを開発する。

2 技術的課題と提案手法

電気分解気泡表示の先行研究 [1] では、泡による画素を数秒で生成可能であったが、画素が自然に消えるまでに 1 分以上の時間が必要であった。よって、ディスプレイの応答速度は低く、アニメーションやスクロールなどの表現が困難であった。また先行研究では、電極への通電時間の調節によりグレースケールの泡ディスプレイが実現可能であると示唆されているものの、高画素な階調表示は未実装であった。そこで本研究では、低い表示応答速度の改善と高画素化・階調表示の実現を行い、2 点

の泡表示デバイスを提案する。

1 点目は、水路を流れる水面にティッカー状の泡表示を行う“UTAKATA”である (図 1)。UTAKATA では、先行研究での表示手法の応答速度を改善するために、流水路を採用した。水路の底面に 7 個の電極を直線状に配置し電気分解を行うことで、泡によるテキストメッセージを水路の下流に向かって流しながら表示できる。

2 点目は、カメラ撮影した来訪者の顔を、グレースケールの泡で表示する鏡のようなディスプレイ“Bubble Mirror”である (図 7)。液体が入った水盤状の装置を覗くと、その水面に顔画像が表示される。Bubble Mirror は、電気分解気泡により高解像度 (1024 ピクセル) のグレースケール (8 段階) 表示を実現する初めての試みである。本論文では、TEI2021 で発表された論文 [2] の内容に加え提案デバイスを以下のように改良し、これに伴う追加実験や議論を行った。

- UTAKATA に関して、電解液の粘性を調整し電極と水路の構造を改良することで、表示歪みを軽減し表示品質を高めた。また、この改良過程における議論と写真を追加した。
- Bubble Mirror に関して、グレースケール表示を 8 段階に拡張し表示品質を高めた。また、8 段階グレースケール表示を実現する電流変調手法を図解した。
- 以上の改良された装置を用いて改めて性能評価実験を実施し、その結果を記述した。
- 各デバイスの対面／オンラインデモンストレーションを通して得られたユーザ体験について報告した。

3 関連研究

3.1 泡を画素として用いる表示

泡を画素として用いる情報提示手法として、水中を上昇する気泡を用いるディスプレイ [3] やシャボン玉自体を画素として用いるディスプレイ [4] が提案されている。これらの装置では、気体の供給や制御のために画素・列ごとにエアポンプや電磁バルブなどの可動部分が必要である。よって、機構が大掛かりになり、高画素表示を安価に実現することが困難である。この問題を解決するために、電気分解を利用した泡ディスプレイが提案されている [1]。先に述べたように、本研究では電気分解泡ディスプレイの応答速度を改善し、高画素のグレースケール

^{*1} 以下に示す冒頭文で、移りゆくものの儂さについて述べられている。「行く川のながれは絶えずして、しかも本の水にあらず。よどみに浮ぶうたかたは、かつ消えかつ結びて久しくとどまることなし。世の中にある人とすみかと、またかくの如し。」

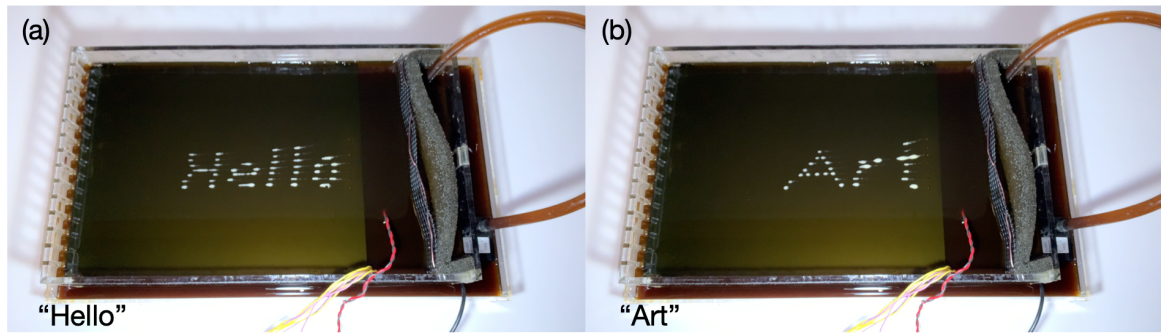


図1 UTAKATAによる表示例. (a)「Hello」(b)「Art」.

表示を実現した。

高解像度の泡ディスプレイを実現するため、フェムト秒レーザーパルスをグリセリンのような高粘度溶液に照射することで生成するマイクロバブルを利用する手法が提案されている [5]。これにより機械的・電気的な部品を使わず光学的に泡による 3D 画素を生成できるが、大型の装置を必要とする。また、高粘度溶液中に泡を生成するため応答速度は低い。我々の提案手法は媒体に低粘度の溶液を使用するため、[5] の手法と比較し応答速度が速い。電気分解により発生する泡を用いたアート作品 [6] が提案されている。この作品では、電極で発生した泡が音楽と同期し煙のように上昇するものの、泡を画素として用い情報表示する機能はない。我々は、電気分解により水面に形成される円形の微細泡群に焦点を当て、これをドット文字の画素として利用する。

3.2 儂さを持つインタフェースやアート作品

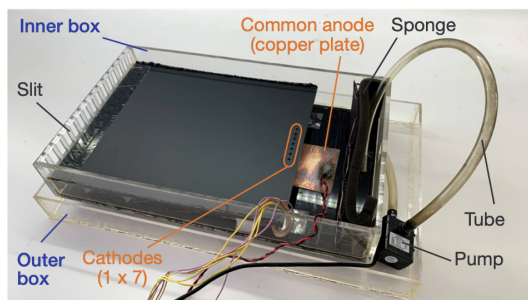
泡により表示された情報は脆く消えやすいため、ユーザの注意を引きつける。このような、限られた時間しか持続しない事象を利用したインタフェースをエフェメラルユーザインタフェース (EUI) と呼ぶ [7]。EUI を実現するために、落水・流水・泡のように、形状が持続しない素材が用いられている。Bit.Fall [8] は落水を使用した EUI の例である。滝のように水滴を落とし、その水滴自体を画素として用いてメッセージを表示する。水滴は地面に向かって落下するので、情報は約 1 秒間しか持続しない。チューブ内を移動する水滴を画素として用いるディスプレイも実装されている [9]。チューブの一部を縦に複数並べ、各チューブ内に着色された水滴を注入し、その位置を制御することで文字を表示する。このディスプレイではチューブを複数本使用しているのに対し、1 本のチューブを任意の物体に巻き付け、多様な形状での

情報提示を可能にする技術も提案されている [10]。透明チューブを用いたディスプレイでは、無秩序に流れていた水滴ビットが、表示領域に近づくにつれ徐々に文字を形成し消失する。このような一時的なメッセージの表示はユーザの注意を引きつけ、興味深い体験を創出する。

泡も EUI によく使われる素材である。白煙が注入された浮遊するシャボン玉の表面に投影を行い、空中ディスプレイとして利用する手法が提案されている [11]。この手法では、シャボン玉を指で触り破裂させることで、投影される映像が変化するようなインタラクションが可能である。また、シャボン玉の内部に香り付きの白煙を注入することで、視覚的な出力だけでなく、嗅覚への情報提示を行う研究も提案されている [12, 13]。シャボン玉自体をタンジブルな入力のために利用する手法も提案されている [14, 15]。石鹼水の入った容器の上にシャボン玉を置き、その位置を指で移動させ入力を行う。さらに、人のコミュニケーションの儂さをシャボン玉を使用して表現したアートプロジェクトも存在する [16]。このように、水や泡は流れ、破裂し、消失することで儂さを体現するため、EUI のための素材や表現媒体として有用である。我々も水と泡の儂さに着目し、これを利用して独自の体験を提供することを目指す。

本研究での提案手法に近いユーザ体験を提供すると考えられるアート作品は、Bit.Flow [9] と Wooden Mirror [17] である。Bit.flow は UTAKATA と同じく、水を流すことで情報を提示するティッカー状のディスプレイである。先述したように、チューブの中を流れる水滴を画素として用い、メッセージを表示する。Wooden Mirror は、木片自体を画素として使用したディスプレイである。Bubble Mirror と同様に、デバイスと対面する人の顔画像を約 30×30 画素で表示する。Wooden Mirror

(a) UTAKATA without liquid



(b) Water circuit

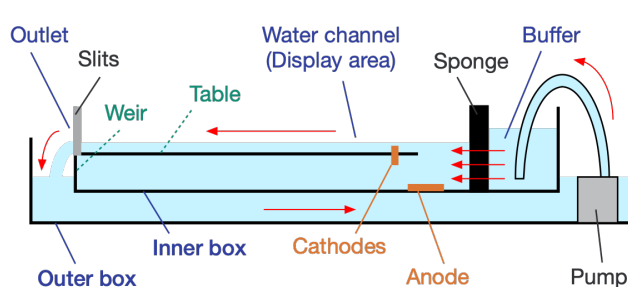


図2 (a) 電解液を入れる前の状態の UTAKATA. (b) 水回路の断面図 (右側が上流, 左側が下流). 内箱の中では下流に向かって (右から左へ) 水が流れ, 外箱の中では上流に向かって水が流れる. 赤い矢印は流れの方向を示す.

は木片の角度を制御することでグレースケール表示を実現するが, 我々は可動部分のない電極への通電時間を制御することでグレースケール表示を行う。

4 UTAKATA

本節では, 流水を用いたティックー方式泡ディスプレイ UTAKATA について報告する. 図 1 に動作例を示す. 図 2(a) は, 電解液を入れていない状態の装置の外観である. 装置はアクリル製の内箱と外箱で構成され, 内箱には表示のための浅い水路が設置されている. 水路の上流部の底面に 7 個の電極 (陰極) が直線上に配置されており, 任意の複数電極に通電することで水面に泡による画素列を生成することができる. これが下流に向かって流れることで, 縦 7 画素のティックーディスプレイを実現できる. 本実装における主な技術的課題は, 流れる水の表面に泡によるドットを生成し, 流路上に歪みの少ないドット表示を実現することである.

4.1 流水の制御

図 1 に示すように, 内箱が外箱の中に設置されており, 中にインスタントコーヒー (電解液の選定理由は第 4.2 節を参照) が入っている. 内箱は厚さ 5 mm のアクリル板で作成され, 大きさは約 350 mm × 210 mm × 60 mm である. 内箱は 20 mm の脚を使用し外箱よりも高い位置に設置した.

水流を発生させるために, 内箱に水を供給し排出する必要がある (図 2(b)). 水を供給するために給水ポンプを外箱に設置し, ポンプにつながるチューブを内箱の上流側に配置した. ポンプより送り込まれる水は, 内箱上流部の貯水部に貯められる. このとき, ポンプの影響に

よる乱流を緩和するために, 貯水部と水路との間 (陰極から 60 mm 上流の位置) に厚さ 10 mm のスポンジを配置した.

内箱の排水部には, アクリル板による堰とスリットを設置した. 泡表示を歪ませないためには, 水面付近の流れを均一に近づける必要がある. 単純な堰の構造の場合, 排水部では水面付近の水のみが流れるのに対し, 上流部では水面だけでなく水深の深い部分でも流れが起きる. よって, 上流部では水面流速が遅いのに対し排水部では流速が速くなり, この結果, 下流部で流れが加速し泡表示が歪んでしまう. そこで, 水底付近の流れと水面付近の流れとを分離するため, 25 mm の脚を持つテーブルを設置し水路の底面を堰と同じ高さまで上げた. これにより, 表示領域の水流を均一に近づけた. また, 下流端の堰上部に微小な凹凸があると, 特定の部分から集中して排水され表示が歪む原因となる. そこで, 堰の上に整流効果のあるスリット (幅 10 mm, 4 mm 間隔) を配置し, 堰を乗り越える際の水面の流れを均一に近づけた.

4.2 泡生成機構

電気分解気泡による表示を実現するため, 内箱の上流部に共通陽極と画素表示用電極 (陰極) を設置した. 共通陽極には 150 mm × 62 mm の銅板を用い, 内箱の底面に設置した. 画素表示用陰極には先行研究 [1] と同様の柱状金メッキピンヘッダ部品を 7 個使用し, 水路の入り口に 7.6 mm 間隔で直線状に配置した. 静水での表示を行う先行研究ではこの電極形状で高品質の画素表示が可能であったが, 流水面での表示においては, 高粘度溶液を使用した場合, 図 3 のように画素が糸を引くように残存する現象が見られた. これは, 発生した泡がピンの側

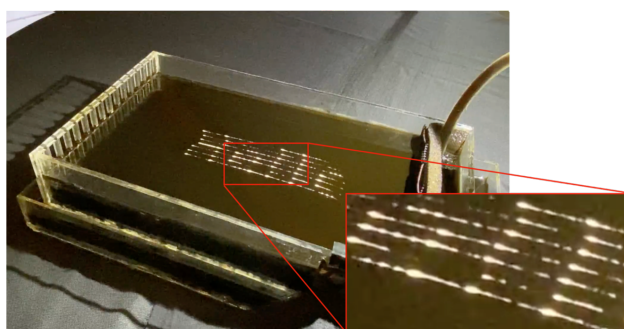


図 3 陰極ピンの側面を防水せずに表示を行った例。通電停止後、ピンの側面に付着していた泡が、気泡ドットの後ろに糸を引くように残留している。

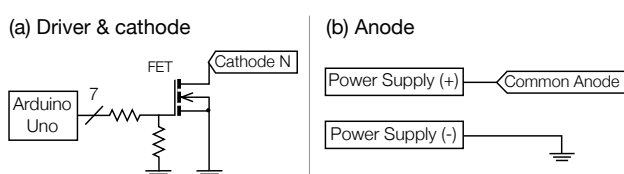


図 4 N 行目の配線を示す回路図. (N = 1~7)

面に付着し、通電停止後にその泡が離れ徐々に水面上上昇し現れることが原因と推測できる。そこで、柱状のピンの側面をレジンで防水し、頂点のみが溶液と接触するようにした。この結果、ピン側面への泡の付着を防ぐことができ、図 1 程度の鮮明な表示が実現できた。

電解液は、先行研究 [1] と同様に炭酸水素ナトリウム (0.55 % w/v) を添加したインスタントコーヒー (1.3 % w/v のコーヒー粉を使用) を用いた。コーヒーは微細な白い泡を安定して保持するため、着色した水などより泡表示に適している。また、コーヒーは水溶性であるため、一般的な顔料で着色した液体などと比較してポンプやスポンジでの詰まりを起しにくい*2。先行研究では、溶液にわずかに粘性を与えるためコーンスターチを使用していた。このときの溶液の粘度は 10 mPa·s であった (液温は約 25°C)。一方、本研究では、流水面上に泡によるドットを拡散させず保持するために、溶液の粘性を高める必要がある。そこで、コーンスターチの代わりにデキストリンや CMC による増粘剤*3 (0.08 % w/v) を添加し、粘度を 20 mPa·s とした (液温約 25°C)。

図 4 に UTAKATA の回路図を示す。7 個の画素表

*2 これまで 1 年以上同一のポンプやスポンジを詰まらせることなく使用できている。

*3 日清オイリオ, トロミアップ HP

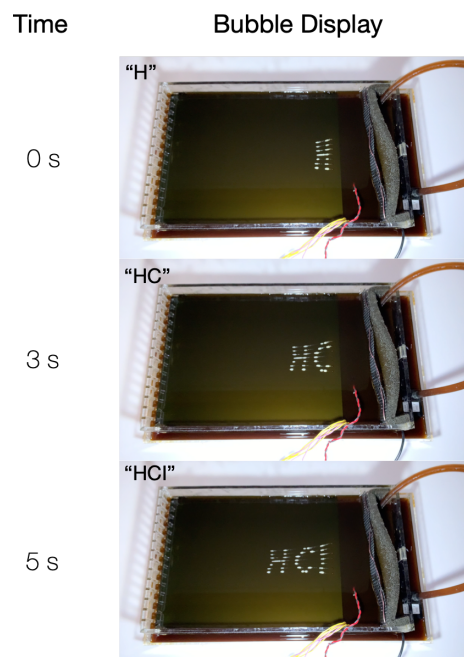


図 5 泡文字「HCI」が流れながら表示されている。上から下に向かって、「H」、「HC」、「HCI」と表示されている。

示用電極が MOSFET*4 を介して Arduino UNO に接続されている。MOSFET のゲートは Arduino に、ソースはグラウンドに、ドレインは電極に接続されている。Arduino が MOSFET を活性化すると、対応する電極が接地される。接地された電極は電気分解の陰極として機能し、その電極から水素が発生する。図 4 (b) に示すように、直流電源の正の出力を共通陽極に、負の出力を接地に接続した。

4.3 性能評価

図 1 に UTAKATA により複数のアルファベットを表示した例を示す。このとき、30 V の電圧を印加し、各電極に流れた電流値は約 34 mA であった。1 文字表示するのに 1~7 個の電極に通電するため、合計で約 34~238 mA の電流が流れ、1~7 W 程度の電力を消費する。また、表示領域の水位は約 4 mm であった。陰極の間隔が 7.6 mm であるため、垂直方向の表示画素密度は約 3 dpi であった。泡による画素は直径約 4 mm であり、中央の泡の流速は陰極付近で約 14 mm/s であった。

図 5 に、水流による泡文字の時系列変化を示す。本システムは 250 mm の表示領域幅 (陰極から排水部までの

*4 東芝, 2SK2232

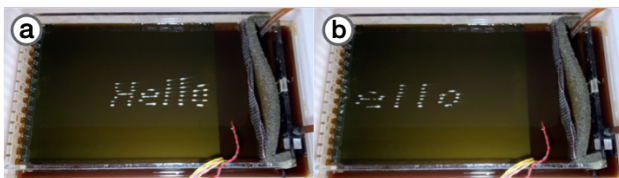
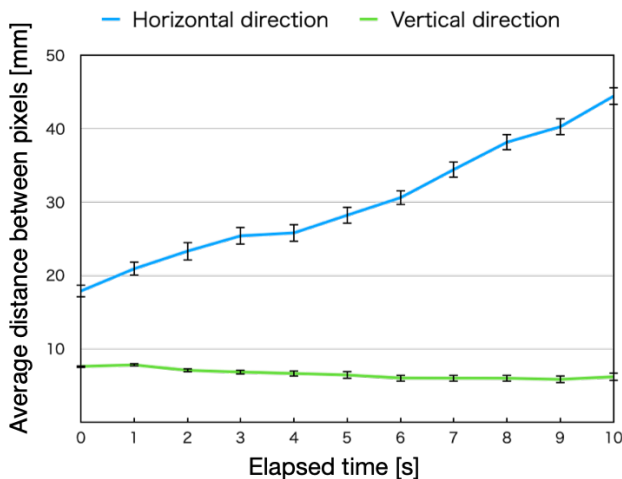


図6 (上) 泡による画素生成後の平均画素間距離の変化を示すグラフ。(下 a) 生成直後の泡文字「Hello」。(下 b) 5 秒後の泡文字。

長さ)を持つ。画素の直径が約 4 mm であることから、横幅 5 ドットの文字であれば、隣接する画素との間隔を 4 mm 以下に設定することで最大 6 文字まで同時観察可能であった。将来的に、水路をより長くすることで同時観察可能な文字数を増やすことができると考えている。

本章冒頭で述べたように、UTAKATA の主な技術的課題は流路上に歪みの少ない泡によるドット表示を実現することである。そこで、提案デバイスで表示した泡文字がどの程度崩れるかを調査した。このとき、一部の画素が部分的に大きく移動したとき、すなわち、各画素間(垂直方向および水平方向)の距離の最大値と最小値の差が画素の直径相当(4 mm)を越えたら文字が崩れたと判断した。垂直方向の測定では 1×7 画素をオンにして流し、水平方向の測定では 2×7 画素をオンにして流し、垂直・水平方向の隣接する画素間の距離を 1 秒ごとに測定した。垂直方向では、泡が生成してから 12 秒後に画素間距離の差が最大となり(画素間距離の最大値: 9.5 mm, 最小値: 6.8 mm)、水平方向では、9 秒後に画素間距離の差が最大となった(画素間距離の最大値: 41.8 mm, 最小値: 38.5 mm)。いずれも、最大値・最小値の差が画素直径である 4 mm を超えることはなく、現在の

システム構成では流路全体において文字の崩れが画素直径以下であることがわかった。ただし水平方向では、局所的な崩れは発生しないものの、全体として下流に近づくほど画素間距離が長くなる傾向があった。下流方向で流速が増加することによる変形と考えられる(図 6)。流速をさらに均一にするためには、流路構造や、溶液粘度などのさらなる調整が求められる。

4.4 ユーザ体験と評価

ACM TEI2021 において国外を含む 30 名程度に対し UTAKATA のオンラインライブデモンストレーションを行った。本デモンストレーションでは、本研究により改良された装置を使用した。UTAKATA の流水面上の泡による表示に関して、「歪んだり軌跡が残るのもこれはこれで面白い」「フリップドットディスプレイやブラウン管ディスプレイに類似した魅力的な欠点があるように、UTAKATA の歪みには確かに美しさがある」という意見が得られた。これらの意見より、水流による泡文字の歪みをあえて利用する表現の可能性が示唆された。また、UTAKATA は 2020 アジアデジタルアート大賞展 FUKUOKA にて一般/インタラクティブアート部門で入賞した [18]。言葉が本来持っている儚さを水面を流れて消えていく泡で表現したアート作品として、審査員に評価されたと考えている。

5 Bubble Mirror

本節では、Bubble Mirror について報告する。図 7 に概要と使用例を示す。電気分解を利用した泡ディスプレイの先行研究 [1] では、画素数の拡張可能性やグレースケール表示の可能性が示唆されている。本研究では、これに基づき、電気分解気泡を利用した高解像度のグレースケール表示を実装した。図 7(a) に示すように、水盤の底面に 32×32 の画素表示用電極を設置した。そして、覗き込んだ人の顔をカメラ撮影し(図 7(b))、その顔画像を電気分解により生成する 8 段階のグレースケールの泡で表示する機構を実装した(図 7(c))。本実装では、1,000 画素以上の泡による表示が可能なディスプレイの製作と、グレースケール表示のための適切な電極制御などの技術的課題に取り組んだ。

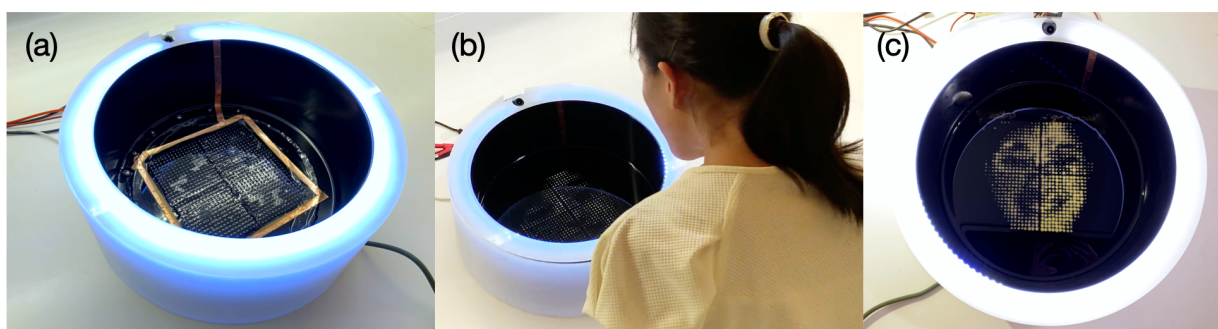


図7 Bubble Mirror. (a) 水盤の底面にマトリクス陰極群と共通陽極が配置されている. (b) 水盤の中を覗きこむと、水面に顔画像が表示される. (c) グレースケール (8段階) の泡による顔画像表示の例.

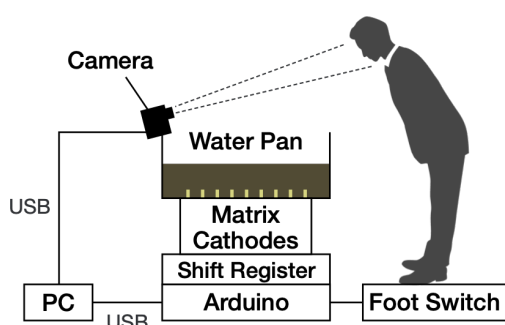


図8 Bubble Mirror のシステム構成.

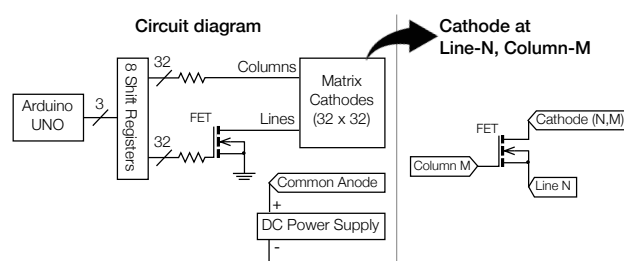


図9 回路図. 右側に N 行 M 列の配線を示す (N = 1 ~ 32, M = 1 ~ 32).

5.1 システム構成とユーザ体験

図8にBubble Mirrorの全体構成を示す. 本システムは、水盤、Arduino UNO、フットスイッチ^{*5}、USBカメラ、Processingプログラムが動作するPCから構成される. 水盤の中には、インスタントコーヒー粉で黒く色づけされた電解液が入っている. PCとUSB接続されたArduinoは、電気分解の電流制御とフットスイッチの読み取りを行う. PCはArduinoからフットスイッチの状態を受信し、表示画像データをArduinoへ送信する.

体験者がシステムの前に立つと、フットスイッチが体験者の存在を検出する. 体験者が水盤を覗き込むと、カメラにより顔が撮影され、泡の画素により水面に顔画像の静止画が表示される. 水盤の周囲には、覗き込む人の顔を照明するLEDテープを貼り付けた. LEDの光を拡散させるために、LEDテープの上に厚さ3mmのドーナツ型の白い半透明の亚克力板を設置した.

5.2 泡生成機構

図7(a)に、電解液が入っていない状態の水盤の底部を示す. 関連研究の節で説明したWooden Mirrorの画素

数を参考に、 32×32 のマトリクス電極(陰極)を表示のために使用した. 試作コスト低減のために、5.1mm間隔で 16×16 個のマトリクス陰極をプリント基板上に作成し、これを4枚並べて 32×32 個の画素用電極(陰極)とした. そして、マトリクス陰極の周囲に共通陽極を配置した. マトリクス陰極全体のサイズは $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ である. 陰極には金メッキピンヘッダ部品を使用し、共通陽極には銅テープを用いた. 電解液には、UTAKATAと同様に炭酸水素ナトリウム(0.4% w/v)とコーンスターチ(0.4% w/v)を添加したインスタントコーヒー(1.3% w/vのコーヒー粉を使用)を用いた. この溶液の粘度は $10 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ であった(液温約 25°C).

図9にBubble Mirrorで使用した回路図を示す. 任意の電極を接地させることで、その電極が陰極として機能し、水素の気泡を生成する. 画素ごとのハードウェアは、先行研究[1]のアクティブマトリクス回路と同様である. しかし、先行研究で実装した100画素のバイナリ表示機構では、鮮明な顔画像を表示するには不十分である. そこで本実装では、1,024画素に拡張し、これらをパルス密度変調(PDM)することでグレースケール表示を実現

^{*5} Tapeswitch Corporation, Sensing Mat CVP1723

した。図 9 の左側に示すように、Arduino の 3 個のデジタル出力端子に 8 個の 8 ビットシフトレジスタ*6を接続し、32 カラム 32 ラインの配線に接続した。Arduino からの制御で MOSFET*7が活性化すると、各ライン配線は接地される。図 9 の右側に、N ライン M カラムの交点にある 1 画素の表示用電極をスイッチングする回路を示す。マトリクス各交点は、MOSFET と表示用電極で構成されている。Arduino からの制御で、任意の複数のカラム配線には High または Low の電圧がかかり、32 本のうち 1 本のライン配線が接地する。カラム配線に High の電圧が印加されると、交点部分の MOSFET が活性化し、接地されたライン配線上の表示用電極が接地する。この過程を 32 本の各ライン配線について繰り返すことで、任意の電極を接地させることができる。接地した電極は電気分解の陰極として機能するため、その電極から水素の気泡が発生し、泡による表示が実現できる。電気分解用の電流を供給するために、安定化直流電源の正の出力を共通陽極に、負の出力を接地に接続した。

Arduino プログラムは、それぞれのライン配線上の任意の複数電極に 10 ms の通電を行う。これを 32 本のライン配線全てに対し行うため、全ラインを走査するために全体で 320 ms の時間を要する。電気分解電流の PDM 制御により 8 段階のグレースケール表示を実現するため、320 ms の全ライン走査を 7 回繰り返すプログラムを作成した (図 10)。この 7 回の走査において、グレースケールのレベル N(0~7) に割り当てられた電極に対して N 回 (合計 $N \times 10$ ms) 通電するようプログラムした。したがって、1 画面の描画には 7 回の走査 (所要時間は 2.2 秒) が必要であり、本ディスプレイのリフレッシュレートは 0.45 Hz となる。図 10 右側に、陰極への通電を PDM 制御し生成した泡とその直径を示す。

5.3 顔画像処理

Bubble Mirror では、PC 上の Processing プログラムがユーザの顔を撮影し、その画像を 32×32 画素の 8 段階グレースケール画像に変換する。本手法では、通電時間を調節することで泡の発生量を制御し、画素の面積を変えてグレースケール表示を実現する。そこで、表示に適したグレースケールレベルを決定するために、撮影した

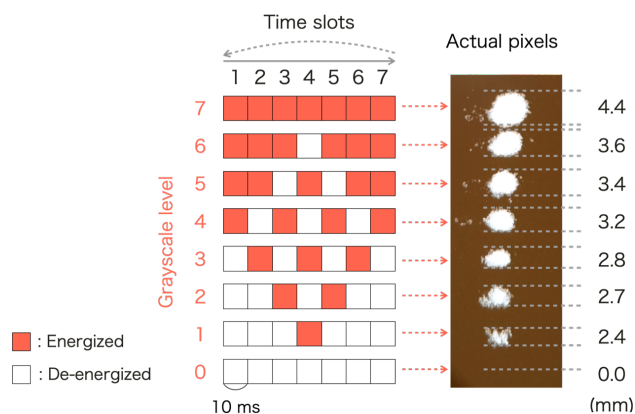


図 10 グレースケール表示を実現するために、電極への通電を PDM 制御した。1 画面の描画について、グレースケールのレベル N(0~7) に割り当てられた電極に対し N 回通電を行う。

顔画像を 32×32 画素の面積階調画像に変換するシミュレーションソフトウェアを作成した。その結果、図 11 に示すように、8 段階のグレースケールであれば人の顔を鮮明に表示できると考えた。

顔画像処理の流れについて説明する。まず、本システムの前に設置されているフットスイッチの上に人が立つと、デバイス備え付けのカメラが顔を撮影し顔認識を行う。顔認識ライブラリには OpenCV for Processing を使用した。次に、カメラフレームの中心付近で検出された顔画像を 100 ms 以上の間隔で 5 枚保存する。保存した画像は 256 階調の 32×32 画素の画像に変換され、その中からブレのない最適な画像を選択する。ここでは、コントラストが最大となる画像 (隣接画素間における、画素値の差の絶対値の合計が最大となる画像) を最適画像とした。最適画像の各画素値は降順ソートされたのち 8 区画に分けられ、各区画ごとに 8 段階のグレースケール値が割り当てられる。結果として、 32×32 画素の 8 段階グレースケール画像が生成される。この画像データを PC から Arduino に送信し、Arduino がこれに応じて PDM の調節をし各電極に通電することで、グレースケールの泡表示を実現する (図 12)。

5.4 性能評価

マトリクス陰極全体のサイズが約 $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ であるため、表示画素密度は 5 dpi であった。鮮明な表示を得るために必要な電解液の水位は約 10 mm であり、このとき印加した電圧値は 30 V であった。全体として

*6 Texas Instruments, SN74HC595N

*7 ROHM Semiconductor, RK7002BMT116

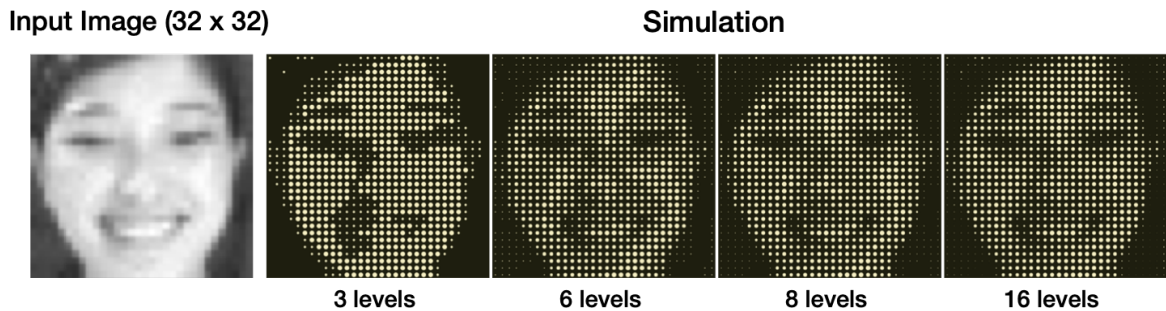
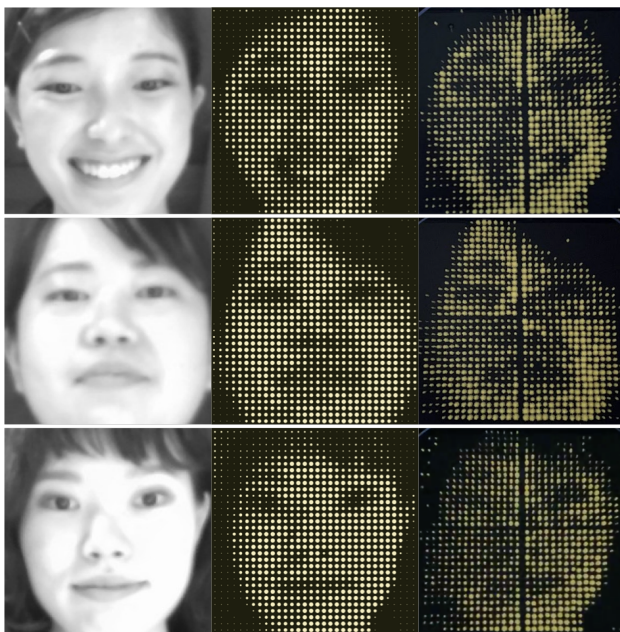


図 11 グレースケールレベルごとの面積階調シミュレーション画像.



(a) Original image (b) 32x32 face image of halftone dots (8 levels) (c) Output of the bubble display

図 12 (a) 顔認識で取得した顔画像. (b) 32×32 画素の網点画像 (8 段階) (c) 実際の泡による表示.

約 300~400 mA の電流が使用され、通常の使用では約 12 W の電力を消費する。

図 12 (c) に示すように、Bubble Mirror に表示される顔は認識可能であるものの、プログラムで割り当てたグレースケール値と実際の明度との間に差が見られる箇所があり、また、中央には黒い十字線が見られた。前述のように、本実装では製作コストを下げるため、16×16 個の陰極を実装したプリント基板を 4 枚並べて水盤底面に配置し、32×32 画素の表示を実現した。この影響で、4 枚のプリント基板の境界部分に黒い十字線が表示された。これは、32×32 個のマトリクス陰極を実装した、より大きな 1 枚のプリント基板を製作することで除去す

ることができる。また、電極群の縁に位置する画素は、中央部分の画素よりも明度が高くなる傾向がある。これは、共通陽極との間の電気抵抗の差が原因であると考えている。すなわち、電極群の縁の陰極は周囲に他の陰極が無い場合、電極群中央部分の陰極よりも、陽極との電流路が大きいことが原因と考えられる。この問題は、画素ごとに明度のキャリブレーションを行い、縁の画素に割り当てられたグレースケール値を減らすよう処理することで解決可能である。さらに、割り当てられたグレースケールから外れた明度を示す画素が一部に見られる。陰極ピンをできる限り均一に処理するよう注意して装置を作成したものの、一部の電極で電気分解特性を揃えられなかったと考えられる。これに対してもキャリブレーションを行い、ソフトウェアで調整することである程度の画質向上が達成できる。図 12 (c) は、手作業によりある程度のキャリブレーションを行った結果画像である。先行研究で提案されている装置 [2] よりもグレースケールレベル拡張し 8 段階にしたことで、より適切なキャリブレーションが可能になり、表示品質が向上した。

Bubble Mirror の Black-to-light-gray (BTG) 応答時間と White-to-dark-gray (WTG) 応答時間を測定した。先行研究 [1] と同様に、0 % gray to 80 % gray 時間を BTG 応答時間とし、100 % gray to 40 % gray 時間を WTG 応答時間とした。測定のために、Bubble Mirror にグレースケールレベル 7 の泡を 1 画素のみ表示しこれをビデオカメラで記録した。このとき、泡表示に必要な電圧値は 30 V で、電流の平均値は 1.2 mA であった。結果としては、10 回計測し、BTG 応答時間は平均 5.4 秒 (SD=1.2)、WTG 応答時間は 60 秒以上必要であった。WTG 応答時間は長いものの、体験者の痕跡が残留することで、本システムのコンセプトを他の鑑賞者に伝

える効果もあると考えている。WTG 時間がユーザ体験に影響を与えるようであれば、ディスプレイに電動ファンを取り付ける、体験者自身に水面に息を吹きかけて泡を消してもらい指示をするなどの手段を検討したい。

5.5 ユーザ体験

我々はこれまでに、対面での見学者と SIGGRAPH Asia 2020 Emerging Technologies (オンライン開催) [19] 参加者の合計 40 名程度に Bubble Mirror のデモンストレーションを実施した。本デモンストレーションで使用した装置は、本研究により改良された 8 段階のグレースケール表示が可能な装置と、旧式版の 6 段階のグレースケール表示が可能な装置 [19, 2] の 2 種類であった。Bubble Mirror を実際に覗いた体験者は、いずれもそれぞれの装置に表示された泡による顔画像を自身の顔であると認識できたと回答した。また、覗いている体験者の周囲にいた鑑賞者やオンラインデモンストレーションの鑑賞者も、泡による顔画像が覗いた本人の顔であると認識できていた。

体験者の中には、自身の顔画像が表示された後、水面に息を吹きかけて顔画像を歪ませるなどのインタラククションを行っている者もいた。この体験者からは、「息を吹きかけることによる顔画像の変化を観察するのが面白かった」という意見が得られた。また、「ラテアートのように、棒を使い直接泡をなぞって顔を自由に変形させてみたい」ともコメントしていた。顎髭がある体験者が本デバイスを覗いて使用した際には、顔の輪郭部分に泡がほとんど発生せず黒く強調されたことで、より自然な顔画像が観察できた。その他に得られた Bubble Mirror の印象として、「泡が出てくるのが想像していたよりかなり速い」「表示された顔画像が自然に歪みながら薄れていく過程を眺めるのが楽しかった」という意見があった。これらの意見により、Bubble Mirror の BTG 応答時間の短さはユーザ体験に好影響を与え、WTG 応答時間の長さは体験に重大な悪影響を及ぼすことはなく、むしろその過程を体験として提供できる可能性があることが示唆された。

6 今後の展望

UTAKATA の実装では、流水面で表示が歪まないことを重視したが、意図的に表示を歪ませることで、文字の変形やアニメーションなどの表現が可能になると考えてい

る。水面上の気泡表示は、表示装置自体を傾けたり、水路の底に段差を設けることで容易に変形する。水路の底面の一部を電氣的に隆起させることで、泡による文字の形状や動きを制御できると考えている。このような、歪みを利用した気泡表示のデザインスペースを今後探求していく。先行研究 [20, 21] を参考にすると、UTAKATA は出力以外にもさらなる入力モダリティを提示可能だと考えている。例えば、ユーザによる水面上のタッチを検出し、それに応じて泡による表示を変化させるなどのインタラククションが考えられる。

さらに、UTAKATA の技術を自然界の小川へ適用することも検討している。先行事例として、流水面にメッセージを投影するアート作品が存在する [22, 23]。この作品では、メッセージが流水面に浮かぶ葉のように漂いながら表示される。作品を通して、石、水、植物などと調和した実世界の庭園にコンピュータ技術を導入しようとした。同様に、我々も UTAKATA の機構を拡大することで、小川などの自然物の表面でのデジタル情報表示を実現できると考えている。これにより、鴨長明が方丈記で表現した概念を実世界で再現するような表現が期待できる。

Bubble Mirror については、インタラククション手法の模索などを含めた、芸術的な観点からの装置の改良を検討している。現在のシステムでは、カメラで撮影した顔画像をそのまま表示しているが、顔画像の意図的な変形やフィルタ処理などを行ったのち表示することも検討している。今後はより多くのユーザに実際に装置を使用してもらい、フィードバックをもとに装置の設計や表示のインタラククションについて改善する予定である。

カメラで顔画像を撮影し、その変形画像をフィードバックする鏡型の表示システムが提案されている [24, 25]。疑似的に生成した表情を視覚的にフィードバックすることで、ユーザに自己の身体反応の変化であると認知させ、快・不快といった感情の喚起を可能にしている。Bubble Mirror においても、擬似的な表情のフィードバックにより感情喚起が可能なのか調査することを検討している。また、電解液や電極の条件を変え、より多様な表現を模索する予定である。

本論文は、泡表示をアート作品へ応用するためのデバイスの実装や性能評価などの技術的側面に主眼を置いた内容である。一方で、本論文で提案したデバイスがアー

トの表現や体験に与える影響が十分に明らかでないことは本論文の制約の一つである。今後、本節で述べたさまざまな表現方法やインタラクション手法を実装し、ユーザ体験のさらなる調査を行う予定である。

7 まとめ

従来の電気分解気泡表示が抱えていた課題を解決し、アート作品への応用を模索する2点の気泡表示デバイスを提案・開発し [2]、これを改良した。1点目は流水を用いたティッカー方式泡ディスプレイ“UTAKATA”である。流水路を採用することで、従来表示の低い応答速度の改善を行った。2点目は、水盤に直面したユーザの顔を水面に泡で表示するディスプレイ“Bubble Mirror”である。従来装置では不可能だった、高解像度(1024ピクセル)のグレースケール(8段階)表示を実現した。また、それぞれのディスプレイの性能評価を行い、今後の展望について議論することで、さらなる表現可能性について模索した。今後は、本稿で議論した内容をもとに、アートとしての体験の設計も行うことで、作品としての価値を高めていきたい。

謝辞

本研究の一部はJSPS科研費21J13365の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Ayaka Ishii and Itiro 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, pp. 619–623, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [2] Ayaka Ishii, Manaka Fukushima, Namiki Tanaka, Yasushi Matoba, Kaori Ikematsu, and Itiro Siio. Electrolysis bubble display based art installations. In *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '21, pp. 13:1–13:9, New York, NY, USA, 2021. ACM.
- [3] Jeremy M. Heiner, Scott E. Hudson, and Kenichiro Tanaka. The information percolator: Ambient information display in a decorative object. In *Proceedings of the 12th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '99, pp. 141–148, New York, NY, USA, 1999. ACM.
- [4] Shiho Hirayama and Yasuaki Kakehi. Shaboned display: An interactive substantial display using soap bubbles. In *ACM SIGGRAPH 2010 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '10, pp. 21:1–21:1, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [5] Kota Kumagai, Satoshi Hasegawa, and Yoshio Hayasaki. Volumetric bubble display. *Optica*, Vol. 4, No. 3, pp. 298–302, 2017.
- [6] Jonathan Bobrow. Bubble display. <http://cargo.jonathanbobrow.com/Bubble-Display>, 2012. 参照 2021年10月14日.
- [7] Tanja Döring, Axel Sylvester, and Albrecht Schmidt. A design space for ephemeral user interfaces. In *Proceedings of the 7th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, TEI '13, pp. 75–82, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [8] Julius Popp. Bit.fall. <https://www.ludwigmuseum.hu/en/news/julius-popp-bitfall>, 2016. 参照 2021年10月14日.
- [9] Julius Popp. Bit.flow. <https://vimeo.com/22390871>, 2011. 参照 2021年10月14日.
- [10] Yuki Inoue, Yuichi Itoh, and Takao Onoye. Tuve: A flexible display with a tube. In *SIGGRAPH Asia 2018 Emerging Technologies*, SA '18, pp. 16:1–16:2, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [11] Masahiro Nakamura, Go Inaba, Jun Tamaoki, Kazuhito Shiratori, and Junichi Hoshino. Mounting and application of bubble display system: Bubble cosmos. In *Proceedings of the 2006 ACM SIGCHI International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, ACE '06, pp. 47–es, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [12] Yutaro Kyono, Takuro Yonezawa, Hiroki Nozaki, Jin Nakazawa, and Hideyuki Tokuda. Fragwrap:

- Fragrance-encapsulated and projected soap bubble for scent mapping. In *Proceedings of the 2013 ACM Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing Adjunct Publication*, UbiComp '13 Adjunct, pp. 311–314, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [13] Sue Ann Seah, Diego Martinez Plasencia, Peter D. Bennett, Abhijit Karnik, Vlad Stefan Otracol, Jarrod Knibbe, Andy Cockburn, and Sriram Subramanian. Sensabubble: A chrono-sensory mid-air display of sight and smell. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 2863–2872, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [14] Tanja Döring, Axel Sylvester, and Albrecht Schmidt. Exploring material-centered design concepts for tangible interaction. In *CHI '12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '12, pp. 1523–1528, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [15] Axel Sylvester, Tanja Döring, and Albrecht Schmidt. Liquids, smoke, and soap bubbles: Reflections on materials for ephemeral user interfaces. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '10, pp. 269–270, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [16] Kyung Yun Choi and Hiroshi Ishii. Bubble talk: Open-source interactive art toolkit for metaphor of modern digital chat. In *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '19, pp. 525–530, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [17] Daniel Rozin. Wooden mirror. <http://www.smoothware.com/danny/woodenmirror.html>, 1999. 参照 2021 年 10 月 14 日.
- [18] 石井綾郁, 福島真花, 的場やすし, 椎尾一郎. UTAKATA/泡沫～Bubble Messages～. 2020 アジアデジタルアート大賞展 FUKUOKA. <https://adaa.jp/ja/winners/winners2020.html>, 2020. 参照 2021 年 10 月 14 日.
- [19] Ayaka Ishii, Namiki Tanaka, and Itiro Siio. Bubble mirror: An interactive face image display using electrolysis bubbles. In *SIGGRAPH Asia 2020 Emerging Technologies*, SA '20, pp. 18:1–18:2, New York, NY, USA, 2020. ACM.
- [20] Hideki Koike, Yasushi Matoba, and Yoichi Takahashi. Aquatop display: Interactive water surface for viewing and manipulating information in a bathroom. In *Proceedings of the 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS '13, pp. 155–164, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [21] Jonna Häkkinä and Ashley Colley. Towards a design space for liquid user interfaces. In *Proceedings of the 9th Nordic Conference on Human-Computer Interaction*, NordiCHI '16, pp. 34:1–34:4, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [22] Tom White and David Small. An interactive poetic garden. In *CHI 98 Conference Summary on Human Factors in Computing Systems*, CHI '98, pp. 335–336, New York, NY, USA, 1998. ACM.
- [23] David Small and Tom White. Stream of consciousness. In *ACM SIGGRAPH 98 Electronic Art and Animation Catalog*, SIGGRAPH '98, pp. 50–50, New York, NY, USA, 1998. ACM.
- [24] Shigeo Yoshida, Sho Sakurai, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Incendiary reflection: Evoking emotion through deformed facial feedback. In *ACM SIGGRAPH 2013 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '13, pp. 8:1–8:1, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [25] Shigeo Yoshida, Tomohiro Tanikawa, Sho Sakurai, Michitaka Hirose, and Takuji Narumi. Manipulation of an emotional experience by real-time deformed facial feedback. In *Proceedings of the 4th Augmented Human International Conference*, AH '13, pp. 35–42, New York, NY, USA, 2013. ACM.

石井 綾郁



2018年3月明治大学総合数理学部先端メディアサイエンス学科卒業。2020年3月お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科博士前期課程修了。同年より同研究科博士後期課程在籍。2021年4月より日本学術振興会特別研究員DC2。ユーザインタフェースの研究に従事。情報処理学会およびACM学生会員。

福島 真花



2020年3月お茶の水女子大学理学部情報科学科卒業。同年4月より同大学大学院人間文化創成科学研究科博士前期課程在籍。ユーザインタフェースの研究に従事。

田中 波輝



2020年3月お茶の水女子大学理学部情報科学科卒業。同年4月より同大学大学院人間文化創成科学研究科博士前期課程在籍。ユーザインタフェースの研究に従事。

的場 やすし



1987年 信州大学理学部生物学科卒業。同年(株)本田技術研究所。1994年 認知症高齢者介護施設の運営に理事として参画。2010年 ものつくり大学ものつくり学研究科修士課程修了。2019年 電気通信大学大学院情報メディアシステム学専攻博士後期課程単位取得済退学。ものつくり大学客員教授。お茶の水女子大学学部教育研究協力員。Laval Virtual Awards2013 グランプリ受賞。情報処理学会会員

池松 香



2019年 お茶の水女子大学大学院 人間文化創成科学研究科 博士課程了。博士(理学)。同年、ヤフー株式会社 Yahoo! JAPAN 研究所 特任研究員。主任研究員を経て2021年より上席研究員。2020年より東北大学電気通信研究所 助教を兼任。情報処理学会、ACM 各会員。

椎尾 一郎



1979年3月名古屋大学理学部物理学科卒業。1984年3月東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。同年4月、日本アイ・ビー・エム株式会社東京基礎研究所に入社。1997年4月玉川大学工学部助教授をへて

2002年4月教授. 2001年4月～2002年3月ジョージア工科大学客員研究員. 2005年4月よりお茶の水女子大学理学部情報科学科教授. 実世界指向インタフェース, ユビキタスコンピューティングを中心に研究. 情報処理学会, ヒューマンインタフェース学会, ACM 各会員. 情報処理学会フェロー. 工学博士.