電解イオンディスプレイ

石井 綾郁 * 池松 香 † 椎尾 一郎 *

概要. 本研究では、電気分解により生成するイオンを利用し、湿潤面上にカラーパターンを表示する手法を提案する.濡れた物体に電極を接触させ通電することで電気分解が起こり、特定のイオンが生成する.このイオンに反応する呈色指示薬を用いて、カラーパターンを表示可能なディスプレイを実現する.電極パターンの実装には、プリント基板のような既存の回路実装技術を適用することができ、ドットパターンやセグメントパターンをコンピュータ制御により表示可能である.また、パターン表示後に逆向きに通電し電極の極性を反転させることで、表示色を薄め、逆電極イオンによる反応色で表示することができる.提案手法は可動部分が不要で低コストであり、小型化が容易である.また、pH 反応性物質を含む一部の食品が表示媒体として使用可能である.よって、湿潤面を持つ日用品や食品を、情報表示の媒体として使用する用途が期待できる.本稿では、ディスプレイの実装と可能な使用形態を報告する.

1 はじめに

テクノロジーの進歩により、人々はいつでも、ど こにいても情報にアクセスすることが可能になった. 情報へのアクセスは主に液晶ディスプレイ(LCD) のような, 平面的で硬い無機質なディスプレイを介 して行われる.一方で、日常生活でよく目にする実 物体は,柔らかく,曲面を持ち,有機的である場合が 多い. このような日常的な実物体を利用して, 生活 の中に溶け込むディスプレイを開発する研究が盛ん に行われている. 例えば, これまでに, 泡 [4, 5, 8], 水滴 [15, 6], 結露 [14] などがディスプレイの素材 として使用されてきた. さらに, 温度変化で色が変 わる染料であるサーモクロミックインクを布や糸に 染み込ませ、衣服をディスプレイとして用いる手法 も提案されている [16, 2]. 実物体に対する化学反応 を利用して情報提示を行う手法も提案されている. Organic Primitives [10] では、pH の値に応じて色 や香り、形が変わる材料を実物体に適用し、マルチ モーダルなセンサやディスプレイを作成した.この 研究において、化学反応は pH 反応性物質で覆われ た実物体に酸や塩基性の液体を滴下することで実現 される. しかし、日常的に使用するようなディスプ レイを実現するためには、低コストにコンピュータ 制御可能な化学反応を起こす機構が必要である.

本研究では、電気分解をコンピュータ制御することで、湿潤面にイオンによるカラーパターンを表示する手法を提案する(図 1). 本手法では、濡れた物体に電極を接触させ通電することで電気分解を行う. この電気分解による酸化還元反応のため、電極周辺で特定のイオンの数が増減する. 増減したイオンに反応して呈色反応を起こす指示薬を電解液に加

えると、電極が触れた部分の色が変化する.電極の 実装に、プリント基板 (PCB) などの電子回路実装 技術を用いることで、ドットパターンやセグメント パターンが容易に実現可能である.これにより、コ ンピュータからの制御で特定の電極上で電気分解を 起こし、さまざまなカラーパターンを表示すること ができる.また、カラーパターン表示後に逆方向に 通電し電極の極性を逆にすることで、表示パターン を薄れさせ、逆電極に発生するイオンによる反応色 で表示することも可能である.

本手法のシステムは可動部を必要としないため、大掛かりな装置を必要とせず低コストで実現できる。さらに、電極を柔軟なプレート上に実装することで、曲面上にカラーパターンを表示することも可能である。また、本手法は一部の食品表面にも適用可能である。具体的には、アントシアニンやクルクミンなどのpH反応性物質を含むも食品のうち、湿潤面を持つものに直接情報表示することも可能である。以上より本手法は、食品を含む日常生活でよく見られる濡れた面や柔らかい面、曲面上に任意のカラーパターンを表示することができる。

2 関連研究

日常生活で目にする実物体を画素として利用する情報提示手法が多数提案されている。例えば、泡[4,5,8],水滴[15,6],結露[14],布[16,2]などの実物体を用いた表示が提案されている。本研究では、電気分解により生成するイオンを利用し、任意のカラーパターンを実物体の表面に表示するという新しい手法を提案する。電気分解は、飲料表面に電気分解気泡による情報表示を実現する先行研究でも使用されている[8]。本研究では、泡ではなくイオンを用いることで、複数の色による文字やアイコンを動的に表示する。

Copyright is held by the author(s).

^{*} お茶の水女子大学

[†] ヤフー株式会社

(a) Dot-matrix electrodes

(b) Customized-shaped electrodes

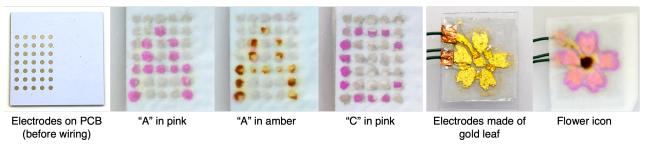


図 1. (a) ドットマトリクス電極のプロトタイプ. 「A」をピンク色で表示した後,逆方向に通電し電極の極性を反転させることで,褐色で表示することもできる。また、「C」など他のパターンを表示することもできる。 (b) 任意の形状に設計可能なセグメント電極のプロトタイプ例.

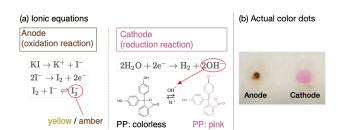


図 2. (a) 陽極と陰極で起こる化学反応のイオン反応式. (b) KIと PP の混合溶液を用いて電気分解を行った例. 金箔で作った一対のドット状電極の上に,溶液を浸した濾紙を設置して電気分解した.

本研究と同様に、化学反応を利用した情報表示が 提案されている。Organic Primitives [10] では、pH の値により色、香り、形状が変化する物質を用いて、 食品や人体、植物などの有機物とのインタラクションを実現した。この研究において、化学反応は pH 反応性物質で覆われた実物体に酸や塩基性の液体を 滴下することで実現される。しかし、コンピュータ 表示デバイスに応用するためには、化学反応をコン ピュータ制御する仕組みが必要である。本研究では、 コンピュータ制御可能な電気分解を利用することで、 化学反応による情報表示を実現した。

また、本研究と同様に、発光部品を使用せずカラー表示を行うディスプレイが多数提案されている。これらのディスプレイには、熱に反応して色を変化させるサーモクロミック材料や、光に反応して色を変化させるフォトクロミック材料が使用される。サーモクロミック材料は、主にテキスタイルディスプレイ [16,2] やタトゥー型皮膚インタフェース [17,11] に使用されてきた。フォトクロミック材料は、ある特定の波長の光を投射することで色が変化する染料である。従来のフォトクロミック材料では透明から一色までしか変化しなかったが、近年、複数の色に変化する材料が開発された [13,9]。これらの研究では、発色のために UV プロジェクタが必要なため、システムが大掛かりになり、高価になってしまう。

一方、我々の提案システムは PCB のような電子回路実装技術が使用可能であり、小型かつ安価な実装が可能である。近年では EL(エレクトロルミネセンス) インクを実物体に適用し情報提示を行う手法も複数提案されている [12, 18, 3]。EL インクは通電により発光する性質を持っているが、2 枚の電極間に誘電体とともに挟みこむ必要があるため、多層構造のインタフェースとなる。一方で、我々の手法は電極と表示媒体の2層で表示を実現することができ、作成が容易である。また、発光しないため、日中の屋外でも使用することができる。

3 イオンディスプレイの概要

本研究で提案する情報提示手法は、ドットマトリックス型またはセグメント型の電極上で電解液の電気分解を行い、発生したイオンを用いてカラーパターンを表示する.電気分解を行うと、電解液中の特定のイオンの数が増減する.このとき、その特定のイオンに反応して呈色反応を起こす指示薬を電解液に添加することで、電極付近の電解液の色を変えることができる.物体の表面または液体中に電極を配置し、カラーパターンを物体に直接表示できる.また、電極の極性を反転し、通電の向きを逆にすることで、表示されたパターンを薄めて、逆電極のイオンによる反応色に切り替え表示することもできる.

4 実装

4.1 電解液

本研究では電解液として、主にヨウ化カリウム溶液(以下 KI, 1% w/v)とフェノールフタレイン溶液(以下 PP, 0.01% w/v)の混合溶液を使用した。これらの溶液は初期の中性の状態で無色透明であり、電気分解による発色の確認が容易である.この混合溶液を電気分解した際のイオン反応式を図 2 に示す.電気分解により、陽極ではヨウ化物イオン(I^-)

	陽極(酸化反応)	初期状態	陰極(還元反応)
KI	黄色~褐色	無色透明	
PP	無色透明		ピンク色
アントシアニン	赤色	紫色	青~緑色
クルクミン	黄色		赤色

図 3. 扱う呈色指示薬の一覧と電極の状態ごとの色変化.

が酸化され,陰極では水(H_2O)が還元される.酸化された I^- はヨウ素(I_2)に変化し,還元された H_2O は水酸化物イオン(OH^-)に変化する.生成した I_2 は再び溶液中に溶解して三ヨウ化物イオン(I_3^-)となり,この物質は陽極上で黄色から褐色を呈する.陰極側では OH^- の増加に伴い,pH の値が上昇する.PP は pH の値が $8.2 \sim 12.0$ の場合にピンク色を呈するため,陰極上でピンク色のパターンを表示できる.

また、食材に含まれる色素を用いることで、提案手法を食品のような日常生活に身近な物体に適用することができる.このような指示薬の例としてはアントシアニンやクルクミンがある.アントシアニンはムラサキイモやベリー類などの食材に多く含まれており、クルクミンは主にターメリックに含まれている.これらの色素はpHの値に応じて色が変化する.アントシアニンは酸性では赤色、中性では紫色、アルカリ性では青色から緑色に呈色する.また、クルクミンは酸性と中性では黄色に、アルカリ性では赤色に呈色する.これまでに説明した、本研究で扱う指示薬の一覧を図3にまとめる.

4.2 電極

ドットマトリクス電極(図 1(a))とセグメントパターン電極(図 1(b))の 2 種類の電極を実装した.

4.2.1 ドットマトリクス電極

ガラスエポキシ製の PCB に、円形平面状のドッ トマトリクス電極を実装した. 電気分解による電極 の溶出を防ぐため,各ドット電極上に純白金箔を貼 り付けた.各ドットの直径は約 3 mm であり,5.1 mm 間隔で5×7のマトリクス状に配置されている. マトリクス電極全体のサイズは約 33 mm×23 mm である. 図 4 にドットマトリクス電極の動作回路図 を示す. 先行研究 [8] と同様に、アクティブマトリ クス回路方式を採用した.35個の電極がアクティブ マトリクス回路に接続されている.先行研究 [8] で は,Arduinoにより各電極が陰極とハイインピーダ ンスの2状態に切り替えられたのに対し, 本研究で は、陽極、陰極、ハイインピーダンスの3状態に切 り替えられる. 電極の極性を切り替えるために, す べてのライン配線とマトリクスの交点に、N チャネ ル MOSFET および P チャネル MOSFET の両方

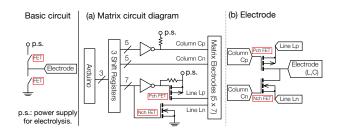


図 4. (左) 基本的な通電制御の仕組み. スイッチングにより電極の状態を陽極, 陰極, ハイインピーダンスに切り替える. (右) L ライン C カラム ($L=1\sim7$, $C=1\sim5$) の配線を示す回路図. L ライン配線と C カラム配線のそれぞれには, P チャネル MOSFET に接続する配線と N チャネル MOSFET に接続する配線(L ラインには「Lp」と「Ln」, C カラムには「Cp」と「Cn」)が使用される.

を使用した. 電極を陽極に切り替えるには, Pチャ ネル MOSFET をオンにし、陰極に切り替えるには、 N チャネル MOSFET をオンにする.両 MOSFET をオフにすると、電極はハイインピーダンスになる. よって、各ラインとカラムには、P チャネル用と N チャネル用の配線が1本ずつ必要である。電気分解 に広範囲の電圧値を適用可能にするために, P チャ ネル MOSFET には外部直流電源が接続されている. 異なる電源に接続された P チャネル MOSFET を シフトレジスタから制御するために、オープンドレ インインバータが使用されている. P チャネルライ ンと N チャネルライン上の MOSFET のソースは, それぞれ外部電源と接地に接続されている. これら の MOSFET を活性化すると各ラインは外部電源ま たは接地に接続され、活性化しない場合はハイイン ピーダンスとなる.

図 4(b) に L ライン C カラムの交点部分の回路 を示す. 各カラムとラインは P チャネル配線と N チャネル配線の2本で構成されているため、4本の 配線が交点で接続する. 画素用電極は N チャネルお よび P チャネル MOSFET 両方のドレインに接続 され、2本のカラム配線はそれぞれのゲートに、2 本のライン配線はそれぞれのソースに接続されてい る. P チャネルラインが活性化(正電圧が印加)さ れて P チャネル MOSFET がオンになると、画素 用電極は正電圧に接続され陽極として機能する. N チャネルラインが活性化(接地)されて N チャネル MOSFET がオンになると、画素用電極は接地され 陰極として機能する. 両 MOSFET をオフにすると 電極はハイインピーダンスとなる. このようにして 各画素電極を3状態のいずれかに設定することで、 コンピュータ制御により任意のパターンを任意の色 で表示することができる. さらに, コンピュータで 動作するソフトウェアを実装し、ユーザによる表示 色の選択や表示パターンのデザインを可能にした.

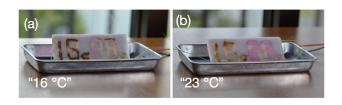


図 5. 湿式の気温ディスプレイ. (a) 今日の気温 (16°C) が褐色で表示されている. (b) 翌日の気温 (23°C) がピンク色で表示される. このとき,前日の気温 ((a) の褐色の表示) が薄く表示されている.

4.2.2 セグメント電極

ドット電極に加えて、7セグメント方式や任意形状のセグメント電極も使用できる。セグメント数が14以上(2桁以上)など多い場合、前節で説明したアクティブマトリクス回路を用いて電極を制御するのが望ましい。一方、セグメント数が少ない場合は、1セグメントずつ個別に制御することも可能である。図1(b)に、任意の形状に設計可能なセグメント電極のプロトタイプ例を示す。この電極は、プラスチック板に純金箔を貼り付けることで作成されている。この電極をワイヤでマイクロコントローラに接続することで、電気的な制御が可能である。レーザーカッターでステンシル用のモールドを作成し、純金箔を貼り付けることで、任意形状のパターンを表示可能な電極を作成することができる。

5 実装方式と応用例

電極と電解液の構成を変えることで、提案手法は 複数の方式で実装可能である.本節では、「湿式」、 「液体式」および、「スタンプ式」の3実装方式についてそれぞれ説明する.

5.1 湿式

電極の上に電解液を染み込ませた表示媒体を置き、その媒体上にカラーパターンを表示することができる。図1に、4.1節で述べた KIとPP の混合溶液を染み込ませた厚さ 0.3 mm の濾紙を媒体として使用し、ドットマトリクス電極やセグメント電極上に設置することで表示を行った例を示す。図1(a)のように文字を一色で表示する場合、PCBの裏側に共通電極を設置し、画素用電極に印加した電圧と逆の電圧を印加することで表示を実現した。本形態では媒体として紙を使用するため、ディスプレイを縦に設置し、表示を横から観察可能にすることもできる。図5は、気温を表示するディスプレイの例である・イオンによる表示は時間経過とともに徐々に薄れていく。よって、表示の彩度によりその情報の鮮度を直感的に表すような表示を実現することができる・

また,表示媒体として電解液を染み込ませた砂も 使用可能である.図6は,媒体として白い砂を使用

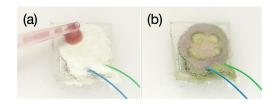


図 6. 白い砂を用いたディスプレイのプロトタイプ. 電解液を砂に染み込ませることで, 笑顔の顔のアイコンが表示される.

し、インタラクティブな表示を実現した例である。 砂の下に電極を配置し、通電を行う。砂が乾燥している場合は何も表示されないが、砂に電解液を染み込ませることで、顔のアイコンが表示される。電解液中の呈色指示薬として、アントシアニンのような生物に無害な物質を用いることで、本手法を植木鉢の中の土に適用できると考えている。また、ドットマトリクス電極も利用可能なため、任意のパターンを土の上に表示できると考えている。これにより、灌水作業を通して植物とのインタラクションを誘発し、植物を世話することを楽しく動機付けできると考えている。

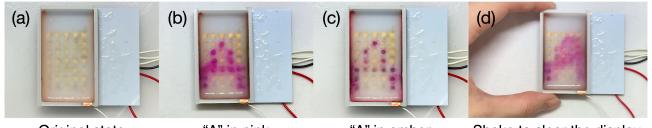
5.2 液体式

電解液は液体の状態のまま使用することも可能で ある. 図7に、電解液として白い液体を使用して文 字をカラー表示する例を示す. ドットマトリクス電 極を実装した PCB 上にアクリル板による高さ約1 cm の隔壁を設置し、ここに電解液を溜める容器を 作成した. この容器に電解液が溜められた状態で電 極に通電することで、任意のカラーパターンを表示 できる. 電解液には 4.1 節で述べた KI と PP の混 合溶液を用い、これに水冷コンピュータで使用され る白色クーラント1を加えた.溶液が透明だと電極 の色が見えてしまい,表示品質が低下する.そこで, 溶液をクーラントにより白く濁らせ表示品質を保持 した、このとき、鮮明な表示のために必要な水位は 約3 mm であった. 容器の縁に銅テープによる共通 電極を設置し、画素用電極に印加した電圧と逆の電 圧を印加することで,図 7(b),(c)のような一色で の表示を実現した. 本形態では電解液を液体の状態 で用いるため、システムを手で揺らしてパターンを 即座に消去することも可能である(図 7(d)).

5.3 スタンプ式

前述の方式では、電解液を含む湿った素材の背面に電極を設置した.これに対して、素材の上に電極をスタンプのように接触させることで、任意の位置に任意のパターンを表示することも可能である. 転写パターンが動的に変化するスタンプとして dotanco[1]などが提案・実装されている. dotanco はスタンプ

¹ EK Water Blocks, EK-CryoFuel Solid Cloud White



Original state

"A" in pink

"A" in amber

Shake to clear the display

図 7. 水中に電極を設置したプロトタイプ. (a) ドットマトリクス電極が実装された容器の中に白く濁らせた電解液が入っている. (b) 液面に、ピンク色のドット文字 $\lceil A \rfloor$ が表示されている. (c) 逆方向の通電により電極の極性を反転させ、褐色のドット文字 $\lceil A \rfloor$ も表示可能である. (d) 容器を揺らすことで、表示パターンを即座に消去することができる.

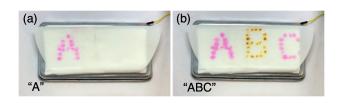


図 8. スタンプ型のプロトタイプ. (a) 電解液を染み込ませた白い紙の上に, ドットパターンを転写. (b) 極性とパターンにより異なる色やパターンを転写.

のインク面が格子状に分割されており、これらの凹凸を機械的に制御することで転写パターンを変化させる.一方で、我々の提案手法では、機械的な可動部分やインクを使用することなく、電極への通電を制御することで任意のカラーパターンを転写することが可能である.図 8 (a) に、電解液を染み込ませた濾紙にスタンプされた文字「A」を示す.通電パターンを変えることで、異なる色や文字をスタンプすることも可能である(図 8 (b)).

パターンの表示媒体として, 湿潤面を持つ食品を 用いることもできる.食品の中には、4.1節で説明し たような、pH の値によって色が変化する物質が含 まれているものが存在する. その食品に電極を接触 させることで、任意のカラーパターンを食品の表面 に表示することができる. 図 9 (a) は, ターメリッ クソースがけのパンの表面にメッセージ「Hi」を表 示した例である. ターメリックに含まれるクルクミ ンは pH の値により色が変化し、酸性・中性では黄 色に、アルカリ性では赤色に変化する(図3).よっ て,任意のパターン状に画素用電極を接地させるこ とで、赤色のパターンをパンの表面に表示すること ができる. また, ミックスベリーパンナコッタの表 面にパターンを転写することもできる. 図 9 (b) に, 表面にARマーカを転写した例を示す。ベリー類に はアントシアニンが含まれており、中性では紫色で あるが、アルカリ性では緑色に変化する性質を持っ ている.よって、ARマーカの形状に設計されたセ グメント電極を接地させることで、緑色のマーカパ

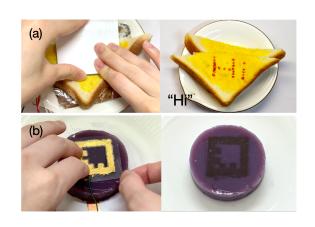


図 9. スタンプ型のプロトタイプを食品に応用した例. (a) ターメリックソースがけのパンに赤色のドット 文字「Hi」を転写. (b) ミックスベリーパンナコッタに AR マーカを転写.

ターンをパンナコッタのような湿った食品の表面に 表示することができる.このマーカは、コントラス ト調節などを行うことで認識可能であった.

6 議論

図 1(a) に示したドットマトリクスパターンを表示するために、5.5 V の電圧を印加し、このとき 1 個の電極に流れた電流値は約 6 mA であった。 1 対の電極に通電しドットが観察できるまでの時間を定性的に測定した。ドットが観察できた状態は、図 1(a) に示すパターンと同程度の発色が視認できた状態とした。その結果、5 節で説明した湿式で濾紙を使用した場合に約5 秒、液体式を使用した場合に約2 秒であった。また、既に色が出ている状態で、逆向きの通電を行い電極の極性を反転させてから、反対色のドットが観察されるまでの時間も定性的に測定した。結果は、濾紙を使用した場合に約25 秒、液体式で約13 秒であった。将来的に、より詳細な表示速度の測定を行うことを予定している。

表示されたカラーパターンは、電極の極性を反転 させ電極付近の電解液を中性にすることで消え、反 対色で表示されると予想した. しかし、特に濾紙を 表示媒体として使用した際,既存の色の完全な消去が難しい場合や,反対色が鮮明に表示されない状況が観察された.今後は,呈色指示薬の濃度や通電制 間の最適値を調査することで可逆性を向上させたいと考えている.一方で,液体式の実装では濾紙を使用した場合と比べて,既存色の消去および反対を色の料態であり表示が拡散しやすいためだと考えられる.一方で,表示が拡散しやすいためだと考えられる.一方で,表示が拡散しやすいためだと考えられる.したがって,可逆性を重視するなら電解液を液体状態で使用し,表示品質を重視するなら紙を使用するなど,状況に合わせて表示媒体を適切に選択する必要がある.

5.3 節で、食品を表示媒体として使用する例を説明した.このとき使用する呈色指示薬は食用である.また、指示薬となる物質はその分子構造が変化することで呈色反応を起こすため、電気分解の過程で有害な副産物が生成することはない.さらに、電極に純白金箔または純金箔を使用しているため、電気分解中に電極が溶出することはない.したがって、提案手法によりパターンが転写された食品は、人体に無害であると考えられる.

7 まとめ

本研究では,電気分解により生成するイオンを利用して,湿潤面上にカラーパターンを表示する手法を提案した.そして,複数の実装方式をその応用例と合わせて報告した.今後は,呈色指示薬や通電時間などの最適値を調査し,より安定した表示が可能なディスプレイの開発を行う予定である.また,開発したディスプレイの性能評価も行う予定である.さらに,さまざまな使用形態に沿った応用例を複数提案・実装することで,日常生活でよく見られる幅広い物体への適用可能性を模索していく.なお,本研究の一部について,ACM UIST 2020 [7] でポスター発表を行った.

参考文献

- [1] dotanco. http://gekitetz.com/dotanco/, 2013.
- [2] L. Devendorf, J. Lo, N. Howell, J. L. Lee, N.-W. Gong, M. E. Karagozler, S. Fukuhara, I. Poupyrev, E. Paulos, and K. Ryokai. "I Don't Want to Wear a Screen": Probing Perceptions of and Possibilities for Dynamic Displays on Clothing. In *Proc. of CHI* '16, pp. 6028–6039, 2016.
- [3] O. Hanton, M. Wessely, S. Mueller, M. Fraser, and A. Roudaut. ProtoSpray: Combining 3D Printing and Spraying to Create Interactive Displays with Arbitrary Shapes. In *Proc. of CHI* '20, pp. 1–13, 2020.
- [4] J. M. Heiner, S. E. Hudson, and K. Tanaka. The Information Percolator: Ambient Information Display in a Decorative Object. In *Proc. of UIST '99*, pp. 141–148, 1999.

- [5] S. Hirayama and Y. Kakehi. Shaboned Display: An Interactive Substantial Display Using Soap Bubbles. In *Proc. of SIGGRAPH '10*, pp. 1–1, 2010.
- [6] Y. Inoue, Y. Itoh, and T. Onoye. TuVe: A Flexible Display with a Tube. In Proc. of SA '18, pp. 16:1–16:2, 2018.
- [7] A. Ishii, K. Ikematsu, and I. Siio. Electrolysis Ion Display on Wet Surfaces. In *Proc. of UIST* '20 Adjunct, pp. 19–21, 2020.
- [8] A. Ishii and I. Siio. BubBowl: Display Vessel Using Electrolysis Bubbles in Drinkable Beverages. In Proc. of UIST '19, pp. 619–623, 2019.
- [9] Y. Jin, I. Qamar, M. Wessely, A. Adhikari, K. Bulovic, P. Punpongsanon, and S. Mueller. Photo-Chromeleon: Re-Programmable Multi-Color Textures Using Photochromic Dyes. In Proc. of UIST '19, pp. 701–712, 2019.
- [10] V. Kan, E. Vargo, N. Machover, H. Ishii, S. Pan, W. Chen, and Y. Kakehi. Organic Primitives: Synthesis and Design of PH-Reactive Materials Using Molecular I/O for Sensing, Actuation, and Interaction. In *Proc. of CHI '17*, pp. 989– 1000, 2017.
- [11] H.-L. C. Kao, C. Holz, A. Roseway, A. Calvo, and C. Schmandt. DuoSkin: Rapidly Prototyping on-Skin User Interfaces Using Skin-Friendly Materials. In *Proc. of ISWC '16*, pp. 16–23, 2016.
- [12] S. Olberding, M. Wessely, and J. Steimle. PrintScreen: Fabricating Highly Customizable Thin-Film Touch-Displays. In *Proc. of UIST* '14, pp. 281–290, 2014.
- [13] P. Punpongsanon, X. Wen, D. S. Kim, and S. Mueller. ColorMod: Recoloring 3D Printed Objects Using Photochromic Inks. In *Proc. of CHI '18*, pp. 1–12, 2018.
- [14] Y. Tsujimoto, Y. Itoh, and T. Onoye. Ketsuro-Graffiti: An Interactive Display with Water Condensation. In *Proc. of ISS '16*, pp. 49–55, 2016.
- [15] U. Umapathi, P. Shin, K. Nakagaki, D. Leithinger, and H. Ishii. Programmable Droplets for Interaction. In *Proc. of CHI EA '18*, pp. VS15:1–VS15:1, 2018.
- [16] A. Wakita and M. Shibutani. Mosaic Textile: Wearable Ambient Display with Non-Emissive Color-Changing Modules. In *Proc. of ACE '06*, pp. 48–es, 2006.
- [17] Y. Wang, S. Luo, Y. Lu, H. Gong, Y. Zhou, S. Liu, and P. Hansen. AnimSkin: Fabricating Epidermis with Interactive, Functional and Aesthetic Color Animation. In *Proc. of DIS '17*, pp. 397–401, 2017.
- [18] M. Wessely, T. Sethapakdi, C. Castillo, J. C. Snowden, O. Hanton, I. P. S. Qamar, M. Fraser, A. Roudaut, and S. Mueller. Sprayable User Interfaces: Prototyping Large-Scale Interactive Surfaces with Sensors and Displays. In *Proc. of CHI '20*, pp. 1–12, 2020.