

Bubble-Pixels : 気泡を用いた図形描画のための 水中ディスプレイの設計と実装

宇川 拓人¹ 小川 剛史²

概要: ディスプレイの性能は向上し、あたかも目の前に現実の物体が存在するような、高解像度で色彩豊かな映像提示が可能となっている。一方で、取り扱うコンテンツの多様化に伴い、視覚だけでなく他の様々な感覚に情報を提示するインタフェースの需要が高まっている。水を媒体としたディスプレイは、形状やサイズなど自由度が高く、感触や温度など多感覚に訴えかけることが可能であり、神秘性や幻想性という要素を持つことから新たなインタフェースとして注目されている。本稿では、気泡を画素とし、手で触れて操作可能な新たな水ディスプレイ Bubble-Pixels における気泡の動きを制御する機構の設計と実装について述べる。実験では、超撥水面の傾斜を変化させ、気泡の軌道とその時間変化を確認した。最後に、水平移動する気泡を画素とした図形の描画を行なった。

Bubble-Pixels: Design and implementation of underwater display for drawing figures using bubbles

TAKUTO UKAWA¹ TAKEFUMI OGAWA²

Abstract: The performance of the displays have been improved, and it is possible to present a high-resolution and colorful image as if a real object existed in front of you. On the other hand, there is an increasing demand for new interfaces that present other senses due to the diversification of contents handled. Water displays are attracting attention as a new interface because it is easy to design shapes and sizes, possible to stimulate multisensory using touch and temperature, has elements of mystery and illusion. In this paper, we describe the design and implementation of a mechanism that controls the movement of bubbles in a novel water display that uses bubbles as a pixel and has high operability. In the experiment, we changed the inclination of the super-water-repellent surface and confirmed the bubble trajectory and its change over time. Finally, we drew figures with horizontally moving bubbles as pixels.

1. はじめに

デジタルコンテンツの多くは液晶ディスプレイに表示され、マウスや専用のコントローラでの操作されることがこれまで主流であった。ディスプレイには高い解像度と豊かな色再現性が求められ、今では目の前の実物と見分けのつかないほど高精細な表現が可能となっている。近年は広告やアートなど、さまざまな分野でデジタル技術が用いられ、

ディスプレイに表示するコンテンツも多様化している。そのため、ただ視覚情報のみを提示するディスプレイではない、新たなインタフェースへの需要が高まっており、ユーザの操作によって柔軟に形状が変化し、ユーザとの多様なインタラクションが可能なのが期待されている。このような背景の下、アイコンなどグラフィカルなイメージを通して操作する GUI (Graphical User Interface) ではなく、物理的な実体のある情報を直接に感知、操作する TUI (Tangible User Interface) [1] が注目されている。TUI は特定のコンテンツに特化したダイナミックな表現や、ダイレクトな操作が実現可能である。物理的な実体としては、水 [2] [3] や砂 [4]、光 [5] など、私たちに身近な自然物も

¹ 東京大学大学院学際情報学府
Graduate School of Interdisciplinary Information Studies,
The University of Tokyo.

² 東京大学情報基盤センター
Information Technology Center, The University of Tokyo.

用いられる。例えば、ジェット水流をキーとして使用するキーボード型の楽器である *Hydraulophone* [2] は、液体の振動を利用した独特な変異に対する応答性により、インタフェースとして新たな価値を發揮している。容器内の水の状態を入力とするゲームコントローラ *Splash controllers* [3] では、ユーザは水が充填された容器を手を持ち、揺すり、傾けることで、中の水に動きを与える。操作に応じ、水が溢れるなど従来のインタフェースにない刺激をユーザへ与えている。このように水を物理的媒介としたディスプレイには以下の特徴 [6] がある。

- (1) 形状やサイズの自由度が高い
- (2) 感触や温度など多感覚に訴えかける
- (3) 省エネルギーで大規模演出可能
- (4) 人への安全性や周辺環境への親和性が高い
- (5) 神秘的、幻想的な表現ができる

水ディスプレイの表現や人に与える印象は既存ディスプレイの範疇を大きく超えるもので、今後の更なる発展が期待される。筆者の研究グループでは、水中の気泡を画素として、気泡に直接接触して操作可能な、インタラクティブ水ディスプレイ *Bubble-Pixels* [7] を提案している。*The Information Percolator* [8] のような従来の水中の気泡を用いたディスプレイの多くは水中を上昇する気泡を画素として絵を表示するため、水が充填された容器を横から覗く形式となっており、気泡に触れて操作するのは物理的に困難である。提案ディスプレイでは、気泡を可能な限り水平方向へ移動させて絵を表示し、水面から気泡への操作を実現する。本稿では、提案ディスプレイにおける気泡の移動を制御する機構の設計と実装について述べる。また、実装した機構により、気泡が描く軌道と図形に関する検証についても述べる。

2. 関連研究

Water-Dome [9] は、水膜へ外部のプロジェクタから映像を投影する。体験者は水膜を被るようにシステムを装着し、水に映った映像を楽しむだけでなく、水越しに見える外の風景や水の感触、音、香りなどを五感で感じる。人や環境との親和性の高さ、複合的な感覚提示など水ディスプレイの可能性を見出した。松村ら [10] は、音響要素や身体動作を入力として水中の気泡を遠隔コントロールするインタラクティブアートを制作した。人の生活に密着した自然現象に注目し、その独特な揺らぎを伴う気泡が新しい表現や、情報伝達メディアとしての意義があることを示した。*バブルディスプレイ* [6] は、水槽内に発生させた気泡をスクリーンとし、プロジェクタから映像を投影する。体験者は気泡の動きや形状を変化させることで、映像とのインタラクションが可能である。水中の気泡に注目し、水ディスプレイの特性を考慮した研究として、著者らのシステムと関連が深い。気泡そのものを画素としたディスプレイに

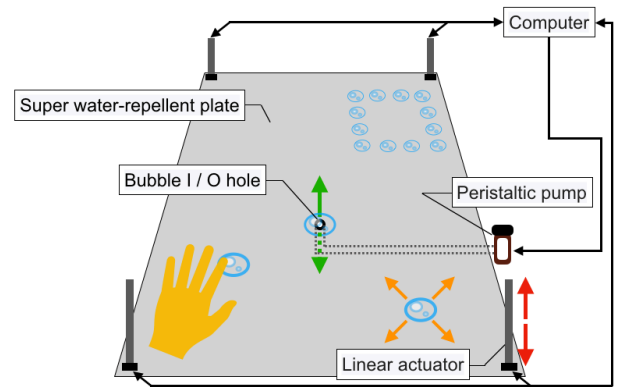


図 1 ディスプレイの概要
 Fig. 1 Display overview

は、*The Information Percolator* [8] や、*Bubbowl* [11] がある。*Bubbowl* では、電気分解により発生した微細な気泡の群を画素とした。簡易的なシステムにもかかわらず、ラテアートのように水面上で高密度、高解像度の表示が実現できる可能性がある。自然界の蓮の葉 [12] や、アメンボの脚 [13] に代表されるような超撥水性を利用した水の形成と操作は、運動学や HCI 分野で多く見られるテーマである。*WATER LOGO '09* [14] や *MOMENTum* [15] は撥水面上で水滴を形成するタイミングを制御することにより、文字や有機的なパターンなどを表現した。*Polka Dot* [16] では、撥水面の形状を変化させることで、水滴の形や大きさ、動きを制御し、情報を提示する方法を検討した。筆者の提案する *Bubble-Pixels* では、気泡を水平方向へと移動させることにより、気泡を画素としながらも触れての操作を可能にし、水ディスプレイの特性を十分に發揮可能な新たなインタフェースの実現を目指している。

3. 提案システム

3.1 ディスプレイ概要

図 1 に提案ディスプレイの概要を示す。超撥水コートを施した板を水中に設置し、四隅には、上下に動くリニアアクチュエータを取り付ける。板上に開けられた穴に接続された蠕動ポンプを制御することにより、気泡の吹き込みと吸い込みを行う。4つのリニアアクチュエータを動かすことにより、板の傾斜を調整し、撥水面上を滑るように気泡を移動させる。吹き込みと吸い込み、移動により気泡を板上に配置し、気泡を画素とした文字や模様を描く。

3.2 気泡の水平移動

固体と液体が接触する際、液面と固体面とのなす角である接触角 [17] により、固体表面が親水性であるか、撥水性であるかが定量化される。一般に、水との接触角が 150 度を超える物体は超撥水であるとされる。超撥水性を有する物体は、水中で表面に薄い空気膜を生じる [18] [19]。この空気膜へ外部から気泡が接触すると、気泡を引っ張る空気

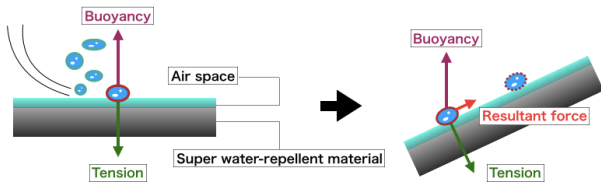


図 2 気泡へ働く力

Fig. 2 Force interacting on a bubble

膜からの張力により、気泡は空気膜と吸着する。本研究では、板の傾斜と浮力を調整することにより、板に沿った気泡の水平移動を実現する (図 2)。

3.3 提案ディスプレイにおける映像表現と操作

従来の気泡を画素としたディスプレイと比較し、提案ディスプレイが新たに可能な表現と操作について説明する。まず、定常的なイメージが描画可能という特徴が挙げられる。従来の上昇する気泡を用いた描画の多くは、イメージそのものも上昇し、消えてしまう。提案ディスプレイでは、画素は定常的にその場に止まり、描画イメージも定常的に存在可能と考えられる。また、気泡の移動方向や、速さの制御性の高さも挙げられる。これまでの気泡ディスプレイの多くは、空気の吐出タイミングの制御に限られ、気泡の移動方向や移動速度の制御は行っていない。撥水面の傾斜角度や、気泡の吹き込み/吸い込み量の制御により、これらを実現できる可能性がある。さらに、気泡が水平移動することにより、水面から気泡を直接触れて操作しやすいという特徴も挙げられる。ユーザが気泡を手で滑り動かし、イメージを描くなどの操作が考えられる。

4. プロトタイプ

4.1 実装

実装したプロトタイプを 図 3 に示す。磁気エンコーダ (Pololu 社 Magnetic Encoder Pair Kit for Micro Metal Gearmotors; 12 CPR; 2.7-18V) を取り付けけたギヤードモータ (Pololu 社 100:1 Micro Metal Gearmotor HPCB 12V) を使用した。ラック・ピニオン機構には、直径 30 mm の平歯車 (小原歯車工業社 SS1-30A) と、全長 98 mm のラックギア (小原歯車工業社 SR1-100) を使用した。ラックギアからディスプレイまでの距離が 120 mm となるよう全長 31 mm、許容トルク 8 N m、許容偏角 30 度のユニバーサルジョイント (三好キカイ社 HJ-6-A-A) と、リニアシャフト (YSK 社 YSSAA) を接続した。ディスプレイは、横 220 mm × 縦 220 mm × 高さ 3 mm のアクリル板の表面に、接触角が 150 度となる超撥水コート剤 (NTT AT 社 HIREC 1450NF) を塗布した。板の中心には、気泡吹き出し用に直径 3 mm の穴を開けた。水槽は、横 450 mm × 縦 300 mm × 高さ 300 mm のものを使用し、ディスプレイの初期位置を水深 100 mm として、実験を行なっ



図 3 プロトタイプ

Fig. 3 Prototype

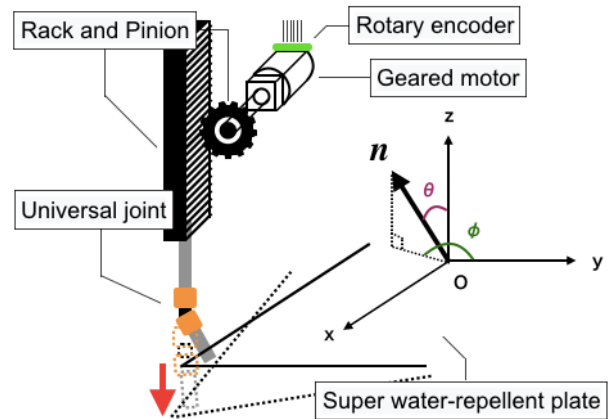


図 4 リニアアクチュエータの設計

Fig. 4 Linear actuator design

た。蠕動ポンプ (Adafruit 社 Peristaltic Liquid Pump with Silicone Tubing - 5V to 6V DC Power) とギヤードモータは、TB6643KQ モータドライバにより PWM 制御した。

4.2 傾斜角度調整機構

リニアアクチュエータの設計 (図 4) について述べる。ラック・ピニオン機構により、ギヤードモータの回転をラックギアの直線の動きに変換する。ラックギアと板は、ユニバーサルジョイントを介して接続され、ラックギアの動きに応じ、板が上下に動く。ギヤードモータの回転の変位はロータリエンコーダにより検出される。板の四隅に設置した 4 つのギヤードモータの回転を制御することにより、板の傾斜を調整する。

4.3 制御システム

実装したシステムでのギヤードモータと蠕動ポンプの制御について述べる。今回、板の中心にある気泡の吹き出し穴の位置が変わらないように板を動かした。図 4 のように、板の法線ベクトルを n とし、板の傾斜角を θ 、傾斜方

向を ϕ として、板の動きを制御する。気泡は浮力により、傾斜の方向へ、傾斜の程度によるスピードで移動すると予想される [7]。板の中心を原点、一辺の長さを L とし、板の傾斜が θ 、 ϕ となるとき、水平位置からの四隅の高さの変位量 Z は (1) 式で計算される。

$$Z = \frac{L(\pm \sin\theta \cos\theta \pm \sin\theta \sin\phi)}{2\cos\theta} \quad (1)$$

平歯車の直径を R とすれば、このとき必要なギヤードモータの回転量 ω_0 [deg] は (2) 式となる。

$$\omega_0 = \frac{360Z}{\pi R} \quad (2)$$

ギヤードモータの回転量の目標値 ω_0 に対し、PID 制御を用いた。予備検証から、エンコーダの系統誤差を含め、板の傾斜の目標値に対する出力値の誤差は平均 0.050 度、最大 0.097 度である。蠕動ポンプは、気泡一つが吹き出す PWM_Cycle = 55 %、ポンプ駆動時間 135 ms で動作させた。

5. 検証実験

実装したプロトタイプにおける図形の描画性能を検証するため、気泡の移動制御性能について実験を行った。

5.1 実験 1：気泡の軌道

5.1.1 目的と内容

プロトタイプにおいて気泡がどのように板上を移動するのかを確かめるため、 $\theta = 1, 2, 3$ 度、 $\phi = 0, 45, 60, 80, 85, 90, 95, 100, 120, 135, 180, 225, 270, 315$ 度を組み合わせた 42 通りの傾斜パターンで実験を行った。各傾斜パターンにおいて、中央の穴から 200ms 間隔で射出された 5 つの気泡が移動する様子をビデオで撮影し、気泡が射出されてから 0.25 秒後、0.75 秒後、1.25 秒後の平均位置を算出した。

5.1.2 結果と考察

各傾斜パターンにおいて気泡が移動した軌道を 図 5 に示す。図はディスプレイ面に対応しており、原点は気泡の射出口である。図中の実線は板の傾斜方向 ϕ に基づく理論上の気泡の軌道を示しており、破線は測定した気泡の座標をつないだおおよその気泡の軌道を示している。実験結果から、気泡は、理論上の軌道に完全には沿って移動しないことが判明した。また、気泡の理論上の軌道と実際の軌道との差は、傾斜方向 ϕ や傾斜角 θ に依存しないことが読み取れる。 $\phi = 85$ 度では、射出後 0.75 秒後に気泡は $\phi = 125$ 度方向へ移動し、もっとも大きな差が生じた。傾斜角が大きくなると、気泡の移動スピードも増加する傾向にある。また、連続して射出した 5 つの気泡の位置の差は 1 mm 以下であった。

実際の軌道と理論上の軌道との間に差が生じた原因は板に生じる空気膜の歪みにあると考えられる。他にも、板の

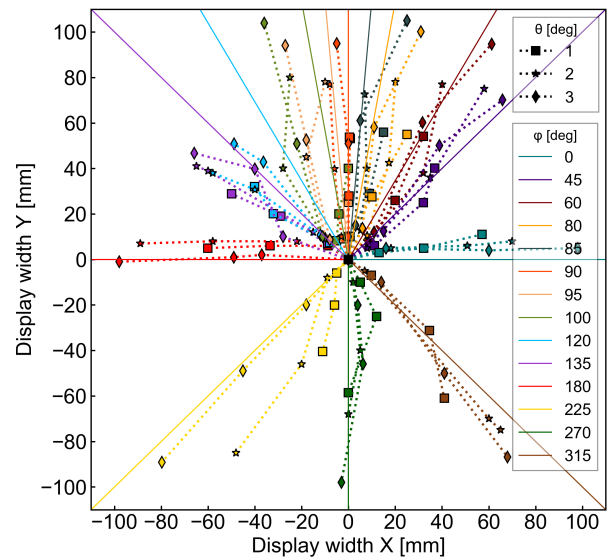


図 5 軌道の傾斜変化

Fig. 5 Inclination change of bubble trajectory

傾き制御における精度や、板自体の歪みなども考えられる。しかし、最大 0.1 度未満の傾斜の誤差が $\phi = 40$ 度程の軌道のずれの原因であるとは考えがたい。また、傾斜の角が変われば、同様の傾斜の方向でも軌道が異なることから、板の歪みの影響は少ないと考えられる。今回、板表面にスプレータイプの超撥水コートを実施したため、面内にコートのムラが生じ、生成された空気膜が歪み、気泡の進行方向に影響が出たと考えられる。水中の超撥水面に生じる空気膜は時間の経過とともに変化し、保持時間は、内部要因 (固体表面の粗さ、形状、化学組成) や、外部要因 (表面エネルギー、圧力、液体の速度) に依存する [18] ことが知られている。短い間隔時間で射出した気泡の各位置に、ほとんど差がなかったことから、超撥水コート剤のムラが影響していると推察する。

5.2 実験 2：軌道の時間変化

5.2.1 目的と内容

実験 1 の結果から、気泡の軌道は空気膜の形状に依存し、空気膜の形状は時間の経過に伴って変化することが示唆されたため、実験 2 では、時間の経過による気泡の軌道の変化について検証を行った。 $\theta = 1.5$ 度、 $\phi = 0$ 度で板を固定し、時間 $t = 0, 30, 90, 270, 570, 1170, 2070, 3870$ s で、実験 1 と同様に連続する 5 つの気泡が射出されてから 0.25 秒後、0.75 秒後、1.25 秒後の位置を計測し、時間ごとに平均を算出した。

5.2.2 結果と考察

計測した気泡の位置を 図 6 に示す。横軸と縦軸は、それぞれ板の横幅、縦幅であり、ディスプレイ上半面の平面図に対応している。 $t = 90$ s までは、気泡は、前後の軌道で 1, 2 mm 程度の違いとなった。 $t = 270$ s では、終端

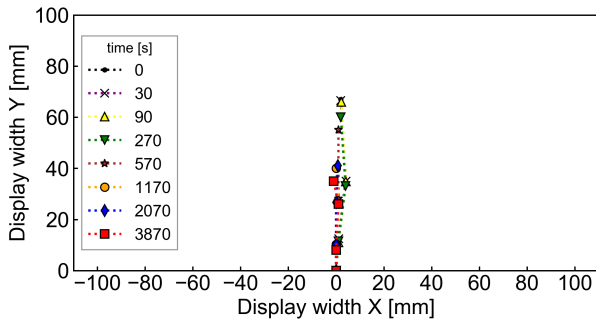


図 6 軌道の時間変化

Fig. 6 Time variation of bubble trajectory

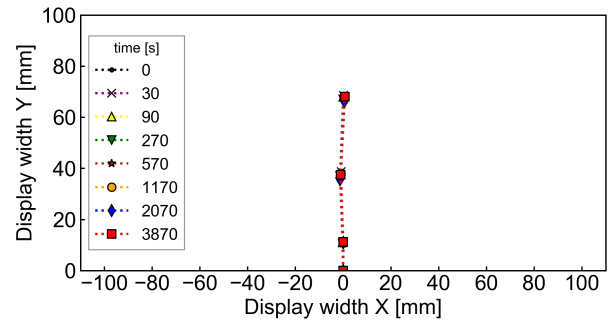


図 7 軌道の時間変化の固定

Fig. 7 Fixing time variation of bubble trajectory

での移動スピードの低下が観察された。t = 570 s からは、軌道の前後で大きな違いが確認された。経過時間が増加するほど、気泡スピードが減少していく様子が確認された。また、t = 1170 s 以降は気泡が途中で停止し、Y = 45 mm 以上移動しなかった。

以上の結果から、やはり空気膜の形状が時間の経過とともに変化し、気泡の軌道に影響していると考えられる。

5.3 実験 3 : 軌道の固定

5.3.1 目的と内容

実験 2 では、気泡が射出されてから 90 秒を超えると、一定した軌道で気泡が移動しない結果となったため、実験 3 では、90 秒よりも短い時間で気泡を射出し続けると、気泡は常に一定の軌道で移動するのかどうかを検証した。実験 2 と同様の設定で気泡を射出し、射出してから 0.25 秒後、0.75 秒後、1.25 秒後の位置を計測した。本実験では、位置を計測する気泡とは別に、30 秒間隔で気泡を射出した。

5.3.2 結果と考察

計測した気泡の位置を 図 7 に示す。横軸と縦軸は、それぞれ板の横幅、縦幅であり、ディスプレイ上半面の平面図に対応している。また、射出してから 0.25 秒後、0.75 秒後、1.25 秒後のそれぞれの位置での標準偏差を表 1 に示す。最大でも 0.75 秒後の位置で $\sigma(Y) = 0.90$ mm となった。

計測対象の気泡とは別に、30 秒間隔で気泡を射出することで、安定した軌道で気泡を移動させることが可能となった。定期的に超撥水面上に気泡が来ることにより、超撥水面上の空気膜が適度にリセットされ、安定した気泡の移動が可能だったのではないかと考えている。一方で、図形の描画とは無関係な気泡を射出することはディスプレイとしての利用に影響があるため、軌道を安定させるための気泡を

表 1 気泡の位置の標準偏差

Table 1 Standard deviation of bubble position

	$\sigma(X)$	$\sigma(Y)$ [mm]
0.25 秒	0.12	0.30
0.75 秒	0.14	0.90
1.25 秒	0.27	0.77

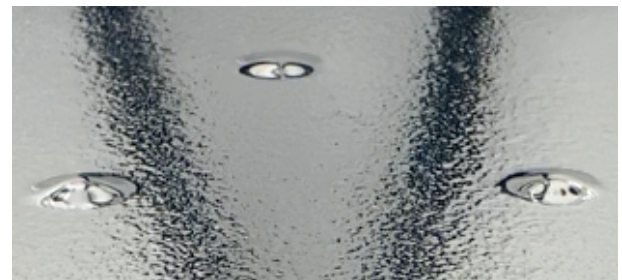


図 8 気泡で描いた三角形

Fig. 8 Triangle drawn with bubbles



図 9 気泡で描いた四角形

Fig. 9 Rectangle drawn with bubbles

射出する場合には、気泡の処理方法などについて検討する必要がある。

6. 図形描画

検証実験で得られた知見をもとに、水平移動する気泡による図形の描画を行った。三角形 (図 8) と四角形 (図 9) の頂点を描画した。図形描画において、空気膜の歪みを考慮した気泡の軌道補正のため、理論上必要な回数以上の気泡の移動を行った。例えば、四角形の描画過程 (図 10) では、理論上 3 回の気泡の移動で描けるはずだが、5 回移動が必要であった。

7. おわりに

本稿では、Bubble-Pixels における水中の気泡の移動を制

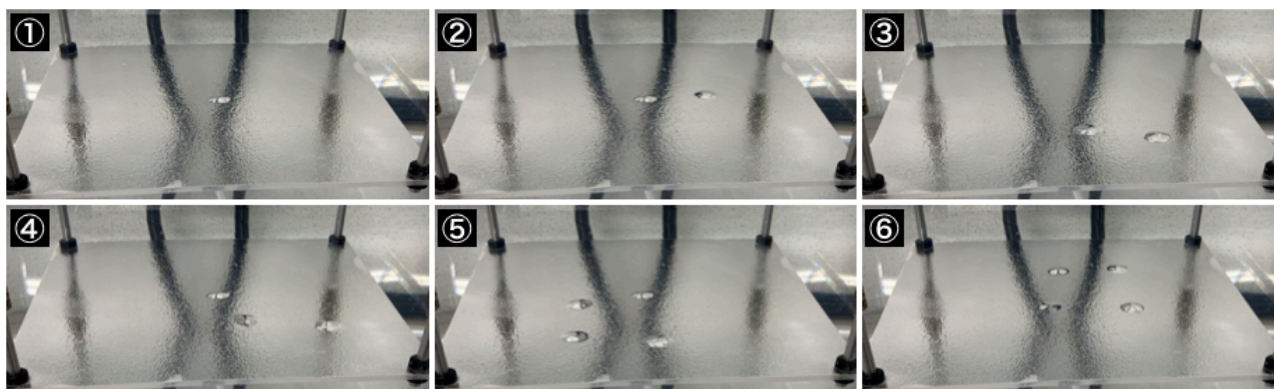


図 10 描画の過程

Fig. 10 Process of drawing

御する機構の設計・実装し、実験により以下の知見を得た。

- 気泡の移動は、空気膜の歪みの影響を強く受け、傾斜方向と最大で 40 度程度差異が生じる。
- 気泡の移動は、空気膜の時間変化とともに変化する。
- 気泡を 30 秒ごとに供給し続けると、気泡の移動は 1 時間程度経過しても変わらない。
- 気泡の移動の差異を考慮した制御を行うことで気泡を配置し、図形は描画可能である。

今後は、空気膜の安定化や、描画の試行の自動化、気泡の吸い込みなどに取り組み、複雑な情報提示を行う予定である。さらに、提案ディスプレイの特性を活かしたインタラクションについても検証を進める予定である。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 19H04150 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] H. Ishii et al.: *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). ACM, New York, NY, USA, pp. 234–241, 1997.
- [2] M. Steve et al.: *Hydraulophone design considerations: absement, displacement, and velocity-sensitive music keyboard in which each key is a water jet*, Proceedings of the 14th annual ACM international conference on Multimedia. ACM, pp. 519–528, 2006.
- [3] L. Geurts et al.: *Splash controllers: game controllers involving the uncaredful manipulation of water*, In Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction (TEI '12), Stephen N. Spencer (Ed.). ACM, New York, NY, USA, pp. 183–186, 2012.
- [4] B. Piper et al.: *Illuminating Clay: A 3-D Tangible Interface for Landscape Analysis*, In Proceedings Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '02). Minneapolis, Minnesota, USA, pp. 20–25, 2002.
- [5] J. Underkoffler et al.: *Emancipated Pixels: Real-World Graphics in the Luminous Room*, In Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York, NY, pp. 385–392, 1999.
- [6] 佐川俊介ら: 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), vol. 2, no. 1, pp. 16–23, 2014.
- [7] 宇川拓人ら: *Bubble-Pixels* : 気泡を操作するインタラクティブ水中ディスプレイの検討, VR 学研報, vol. 24, no. CS-3, pp. 77–82, 2019.
- [8] J.M. Heiner et al.: *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). ACM, New York, NY, USA, pp. 141–148, 1999.
- [9] Y. Sugiura et al.: *Water Dome-An Augmented Environment*, 2000 IEEE Conference on Information Visualization. An International Conference on Computer Visualization and Graphics, London, UK, pp. 548–553, 2000.
- [10] 松村誠一郎ら: 気泡と音響を用いたインタラクティブアート : インタラクティブアートとインターフェイスの新たな可能性, 環境芸術, vol. 2, pp. 29–36, 2002.
- [11] A. Ishii et al.: *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). ACM, New York, NY, USA, pp. 619–623, 2019.
- [12] X. F. Gao et al.: *urity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces*, Nature, vol. 432, pp. 36–36, 2004.
- [13] W. Barthlott et al.: *Water-repellent legs of water striders*, Planta, vol. 202, pp. 1–8, 1997.
- [14] Atelier OMOYA Artworks: WATER LOGO '09, (<http://atelieromoya.jp/works/water-logo-09/>) (2019.12.11).
- [15] KAPPES: MOMENTum, (<https://kappes.jp/momentum>) (2019.12.11).
- [16] Y. Kojima et al.: *Polka dot: the garden of water spirits*, In SIGGRAPH Asia 2013 Emerging Technologies (SA '13). ACM, New York, NY, USA, Article 15, 2 pages, 2013.
- [17] A. W. Adamson et al.: *Physical chemistry of surfaces*, J. Electrochem. Soc., vol. 124, Ch. X, Sec 4, 1997.
- [18] M. Sakai et al.: *Effect of Surface Structure on the Sustainability of an Air Layer on Superhydrophobic Coatings in a Water – Ethanol Mixture*, Langmuir, vol. 25, pp. 13–16, 2009.
- [19] A. Marmur.: *Wetting on Hydrophobic Rough Surfaces: To Be Heterogeneous or Not To Be?*, Langmuir, vol. 19, pp. 8443–8448, 2003.