

研究論文

# Bubble-Pixels : 気泡を用いた図形描画のための水中ディスプレイ

宇川 拓人<sup>1,†1,a)</sup> 小川 剛史<sup>2,b)</sup>

受付日 2020年7月14日, 採録日 2020年11月26日

**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かのよう, 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ともない, 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. 本論文では, 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った.

**キーワード:** 水ディスプレイ, 超撥水, 気泡, インタラクション

## Bubble-Pixels: Underwater Display for Drawing Figures Using Bubbles

TAKUTO UKAWA<sup>1,†1,a)</sup> TAKEFUMI OGAWA<sup>2,b)</sup>

Received: July 14, 2020, Accepted: November 26, 2020

**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.

**Keywords:** water display, super water repellency, bubble, interaction

### 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, 様々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

<sup>1</sup> 東京大学大学院学際情報学府  
Graduate School of Interdisciplinary Information Studies,  
The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan

<sup>2</sup> 東京大学情報基盤センター  
Information Technology Center, The University of Tokyo,  
Bunkyo, Tokyo 113-8658, Japan

<sup>†1</sup> 現在, ソニー株式会社  
Presently with Sony Corporation

a) t.ukawa@ogawa-lab.org

b) ogawa@nc.u-tokyo.ac.jp

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、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多く用いられている。たとえば、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発揮している。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と、操作に応じて、水が溢れるなど従来のインタフェースにはないフィードバックが提示される。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ような特徴 [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

水の特徴を活かした演出はすでにアミューズメント施設などのエンタテインメント分野で多く見られる。チームラボプラネッツ [7] は素足で、水の中を歩きながら体験するテーマパークであり、視覚だけでなく感触や温度も楽しみ、作品への没入度が高い。スペースプリンター [8] は落下する水滴で文字や模様を描いている。周辺環境に溶け込むアンビエントな表現や、その幻想性は多くの人を惹きつけている。

一方、気泡を画素として用いる *The Information Percolator* [9] は水を充填した容器の下から気泡を発生させ、水中を上昇する気泡で文字や模様を表現している。光が当たった気泡がキラキラと光る様子は美しく、人に魅力や興味を感じさせる効果がある。しかし、上昇する気泡を用いることから、一定の時間が経過すれば気泡は水面に到達し、文字などを一定の場所に提示し続けることはできない。また、装置を横から見る構造となるため、ユーザは気泡に対して触れるなどのアクションをとることは困難である。

そこで本論文では、水中の気泡を画素として、気泡に直接触れて操作可能な、インタラクティブ水ディスプレイ *Bubble-Pixels* [10] を提案する。水中の気泡を用いた本システムは、*The Information Percolator* と同様に周囲の光などを受けた気泡の自然な美しさによる効果が期待でき、水中に手を入れ水や気泡に触れることで、その感触や温度を知覚しながら、気泡を操作する新しいディスプレイである。提案ディスプレイを実現するため、水中でディスプレイ面に気泡を定着させ、水平に気泡を移動させることにより、気泡を画素とした図形を描く機構を設計し、実装した。

水中に設置した水平なディスプレイ面は上から見るのが可能で、水面から手を入れて、指を入れて気泡に触れたり、移動させることが可能となる。

以下、2章で関連研究について述べ、3章では提案システムの概要について述べる。4章ではプロトタイプ的设计と実装、5章では気泡の移動特性に関する検証、6章では提案システムを用いた図形描画およびインタラクションに関して述べる。最後に7章において本論文のまとめと今後の課題について述べる。

## 2. 関連研究

*Water-Dome* [11] 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。*HydroMorph* [12] は水膜の形状を動的に制御するインタラクティブディスプレイである。10個のプロッキングモジュールを制御し、水膜に干渉させることにより、水膜を変形させる。水の形状変化を利用し、子供の手洗い誘導や、水の彫刻など、蛇口から噴水まで多岐にわたる日常に密着したアプリケーションを提案した。永徳らは水滴を利用した空間充填型ディスプレイ [13] を提案した。水滴群を平面状に並べて落下させ、下方からプロジェクタで映像を投影し、水滴を画素とした2次元映像を表現した。また、水滴群の落下位置に応じ、プロジェクタからの映像を切り替えることにより、残像によって人に知覚される2次元映像の集合による3次元映像の表示が可能である。*Aqua Top Display* [14] は浴槽内の水面にプロジェクタから映像を投影して、入浴時の身体動作を入力とした対話的な水ディスプレイである。水中での手指の動作に注目し、情報入力に用いることにより、自然で直感的なインタラクションが可能である。また、流体シミュレーションを導入し、手指の動きに応じ表示される仮想物体が浮遊する感覚を与えた。水ディスプレイ特有の新たなインタラクションを提案した。

松村ら [15] 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とまな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は、*The Information Percolator* [9] や、*Bubbowl* [16] 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 [17] や、アメンボの脚 [18] 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 [19] や MOMENTum [20] は撥水面の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 [21] 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。Programmable Droplets [22] は、エレクトロウェットティングの原理を応用し、電圧を加えることで、水滴の撥水性を変化させ、水滴の動きの制御を行った。

### 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。

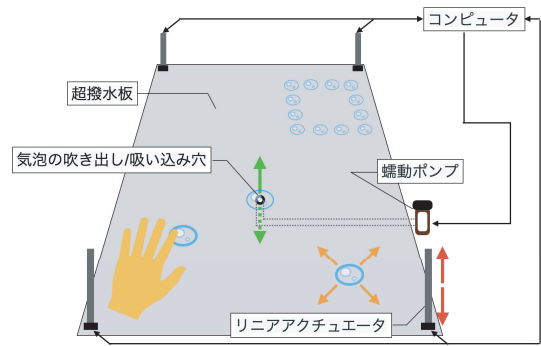


図 1 ディスプレイの概要  
Fig. 1 Display overview.

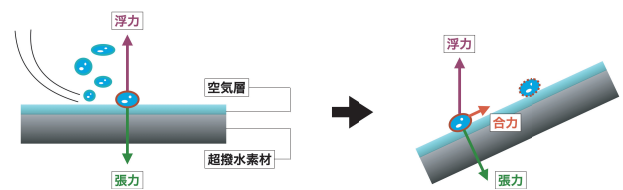


図 2 気泡へ働く力  
Fig. 2 Force interacting on a bubble.

#### 3.2 気泡の定着と水平移動

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 [23] 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 [24], [25]。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 気泡による図形描画

提案ディスプレイでは、図 3 に示すように、気泡の射出と移動を繰り返し図形を描画する。図 3 の例では、4つの気泡 A, B, C, D の射出と超撥水板の傾斜変更による移動を繰り返して、四角形を描いている。超撥水板を水平に保つことで、描画したイメージは消えず提示し続けることが可能であり、上昇する気泡でイメージを描画していた従来システムとは異なる提示が可能である。イメージの消去は、超撥水板を傾斜し続けて気泡を板の縁から出すことで可能である。

また、ユーザによる気泡の移動や消去も可能である。指

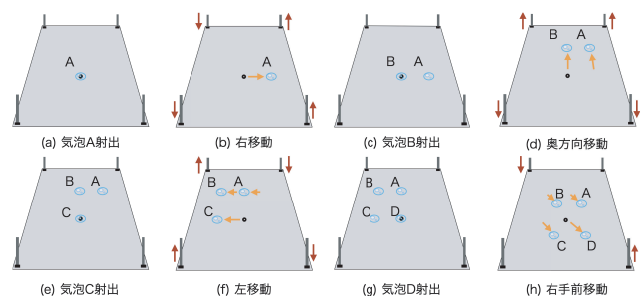


図 3 気泡による描画手順  
Fig. 3 Sample drawing procedure.

で気泡に直接接触すると気泡が指に吸着するため、気泡を引っ張るような感覚で移動でき、少し強く引くことでその場に気泡を留めることができ、水をかき混ぜるような動作でイメージを消去することが可能である。

### 4. プロトタイプ

プロトタイプを実装するにあたり、傾斜角度に対する気泡の定着度および移動速度の関係と空気吐出量に対する気泡の定着度および気泡間距離の関係を調査するため、下記の基礎検証を行った [10]。

#### 4.1 基礎検証 1：傾斜角度に対する気泡の定着度と移動速度

##### 4.1.1 目的と内容

気泡が板に吸着したまま移動可能であるか、また気泡の移動速度はどの程度となるのかを調査する実験を行った。検証に用いた超撥水板を図 4 に示す。板には、直径 1 mm から 5 mm の穴を 8 個ずつ 3 cm 間隔で開けており、同じ



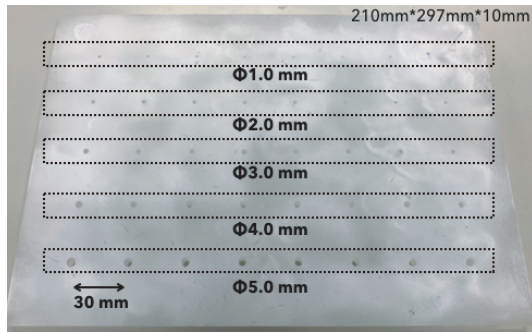


図 4 基礎検証用の超撥水板  
Fig. 4 Super water-repellent plate.

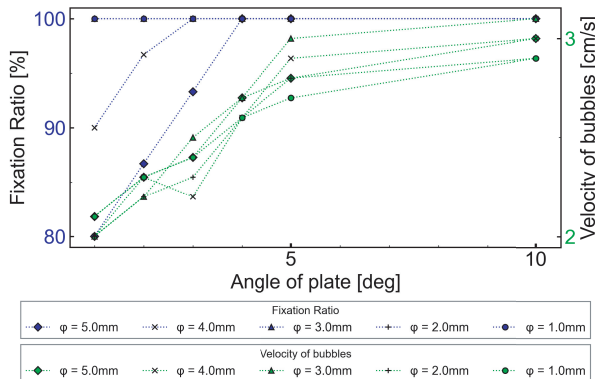


図 5 基礎検証 1 の結果  
Fig. 5 Results of basic verification 1.

直径の穴の上を気泡が通過するように超撥水コートは部分的に塗布している。ポンプの空気吐出量は 4.6 ml/s とし、板の傾斜角度を 1, 2, 3, 4, 5, 10 度と変化させ、最下端の穴から気泡を 30 個射出した。このとき、板から離れることなく最上端の穴まで移動できた気泡の数の割合を定着度と定義する。また、移動速度は、30 個すべての気泡が最上端まで到達できるとは限らないため、最上端に到達することができた 10 個の気泡について、それぞれ到達 1 秒前の位置からの距離を計測し、その平均を移動速度とした。

#### 4.1.2 結果

板の傾斜角度に対する気泡の定着度と移動速度を図 5 に示す。穴の直径が 1.0 mm から 3.0 mm の条件では、すべての気泡が最上端まで到達でき、定着度は 100%であった。気泡が穴の上を通過しても板から離れずに移動できることが確認できたため、板に気泡の射出用もしくは吸い込み用の穴を複数用意することも可能であることが分かった。気泡の移動速度は、板の傾斜角度が大きくなるにしたがって増加する傾向にある。穴の直径が異なっても気泡の大きさに顕著な違いは見受けられず、速度の変化は、板の傾斜角度が関係していると考えられる。

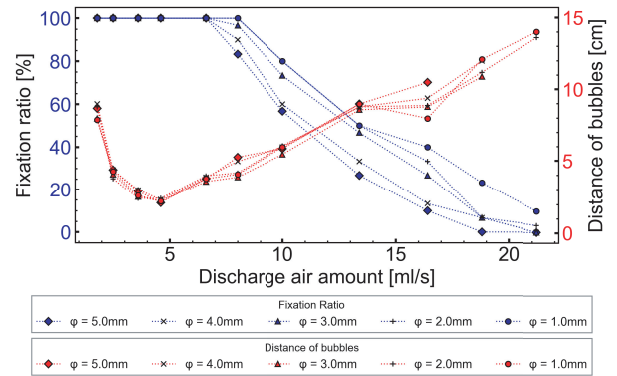


図 6 基礎検証 2 の結果  
Fig. 6 Results of basic verification 2.

## 4.2 基礎検証 2：空気吐出量に対する気泡の定着度と気泡間距離

### 4.2.1 目的と内容

基礎検証 1 と同一の超撥水板を用いて、ポンプの空気吐出量に対する気泡の定着度と気泡間距離を調査する実験を行った。本検証では、連続的に気泡を射出することで密に気泡を並べて移動させることが可能であるかを確認する。ポンプの空気吐出量は 1.8 ml/s から 21.2 ml/s で変化させた。気泡の定着度の定義は基礎検証 1 と同様である。気泡間距離についても、最上端に到達することができた 10 個の気泡について、それぞれが最上端に到達した際に隣にある気泡までの距離を計測し、その平均値を気泡間距離とした。したがって、定着度が低くなる条件においては、気泡間距離も長くなる傾向にある。

### 4.2.2 結果

基礎検証 2 の結果を図 6 に示す。気泡の定着度は空気吐出量が約 7 ml/s 以下では、すべての条件で 100%であったが、それ以降は空気吐出量の増加にしたがい、定着度が減少する傾向となった。一方、気泡間距離は空気吐出量の増加にともない、はじめ 9 cm 程度だったものが 4.5 ml/s 付近で最短の 2 cm となり、その後は単調に増加する結果となった。空気吐出量が 1.8 ml/s から 4.5 ml/s に変化するにしたがって気泡間距離が短くなったのは、気泡がある一定の大きさになってから移動を開始したことが理由であると考えられる。4.5 ml/s よりも大きな空気吐出量になると、気泡の生成頻度がより高くなり気泡間距離がより短くなると期待されるが、定着度が下がり、結果として、気泡間距離が大きくなった。空気吐出量が大きいと少し大きめの気泡が生成されるなど気泡のサイズにムラが生じ、移動速度の違いから移動中に気泡が衝突して板から気泡が離れてしまったものと考えられる。板上を移動する気泡についてではないが、穴から生じる気泡について気体流量と気泡体積のムラに関する議論は文献 [26] でも述べられており、類似した状況が発生していると考えられるため、空気吐出量を低く設定するほうが良いと考えられる。



図 7 プロトタイプ  
Fig. 7 Prototype.

### 4.3 実装

実装したプロトタイプを図 7 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 Nm, 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、気泡吹き出し用の直径 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、実験を行った。蠕動ポンプ (Adafruit 社 Peristaltic Liquid Pump with Silicone Tubing - 5 V to 6 V 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。

### 4.4 傾斜角度調整機構

リニアアクチュエータの設計 (図 8) 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し、ラックギアの動きに応じて板が上下に動く。ラックギアと板をシャフトのみで固定すると構造上の理由から板を傾けることが不可能となるため、ユニバーサルジョイントを間に設置することで板が傾いたときに無理な力がかからないようにしている。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。

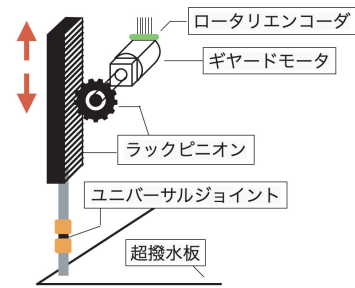


図 8 リニアアクチュエータの設計  
Fig. 8 Linear actuator design.

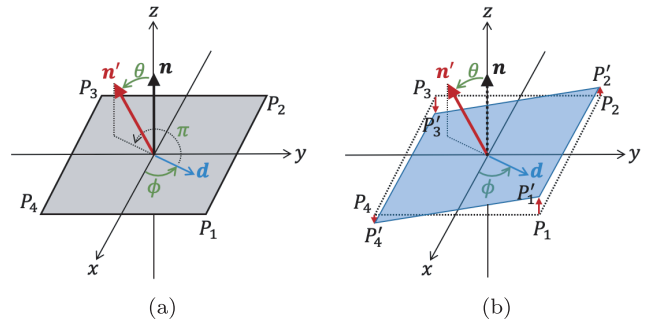


図 9 超撥水板の傾斜角制御

Fig. 9 Tilt angle control of super water-repellent plate.

### 4.5 制御システム

実装したプロトタイプにおけるギヤードモータと蠕動ポンプの制御について述べる。プロトタイプでは、超撥水板の中心を原点として固定するように板の 4 頂点の高さを決定している。図 9 のように、初期状態では超撥水板は水平に固定されており、超撥水板の 1 辺の長さを  $L$  とすると、各頂点の座標は  $P_1(L/2, L/2, 0)$ ,  $P_2(-L/2, L/2, 0)$ ,  $P_3(-L/2, -L/2, 0)$ ,  $P_4(L/2, -L/2, 0)$ , 板の法線ベクトルは  $\mathbf{n} = (0, 0, 1)$  と表現できる。ここで、気泡をベクトル  $\mathbf{d}$  の向きに移動させるためには、板の法線ベクトルが  $\mathbf{n}'$  となるように、板を傾ければよい。

$$\begin{aligned} \mathbf{n}' &= (\cos(\phi + \pi) \sin \theta, \sin(\phi + \pi) \sin \theta, \cos \theta) \\ &= (-\cos \phi \sin \theta, -\sin \phi \sin \theta, \cos \theta) \end{aligned}$$

つまり、板が下記の平面上に存在するように頂点を移動させることとなる。

$$-x \cos \phi \sin \theta - y \sin \phi \sin \theta + z \cos \theta = 0$$

提案システムでは板を大きく傾斜させることは想定していないため、板の傾斜によって各頂点の  $x$  座標,  $y$  座標は変化しないものと近似して計算を簡略化した。各頂点の移動後の座標は以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} P'_1 &\left( \frac{L}{2}, \frac{L}{2}, \frac{L(\cos \phi \sin \theta + \sin \phi \sin \theta)}{2 \cos \theta} \right) \\ P'_2 &\left( \frac{L}{2}, \frac{L}{2}, \frac{L(-\cos \phi \sin \theta + \sin \phi \sin \theta)}{2 \cos \theta} \right) \end{aligned}$$

$$P'_3 \left( \frac{L}{2}, \frac{L}{2}, \frac{L(-\cos \phi \sin \theta - \sin \phi \sin \theta)}{2 \cos \theta} \right)$$

$$P'_4 \left( \frac{L}{2}, \frac{L}{2}, \frac{L(\cos \phi \sin \theta - \sin \phi \sin \theta)}{2 \cos \theta} \right)$$

ここで算出した  $z$  座標の値に応じて、ラックピニオン機構で実装したリニアアクチュエータを操作する。

ギヤードモータの回転量  $\omega_0$  [deg] は、平歯車の直径を  $R$  とすると、次のように表される。

$$\omega_0 = \frac{360Z}{\pi R}$$

ギヤードモータの回転量の目標値  $\omega_0$  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 度であった。

蠕動ポンプの制御については、気泡を 1 つずつ生成できるように、気泡を射出する際にのみ蠕動ポンプを PWM\_Cycle=55% で、135 ミリ秒間動作させた。

## 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 200 ミリ秒間隔で射出された 5 つの気泡が移動の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 10 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  $\phi$  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てい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  $\phi$  や傾斜角  $\theta$  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、最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

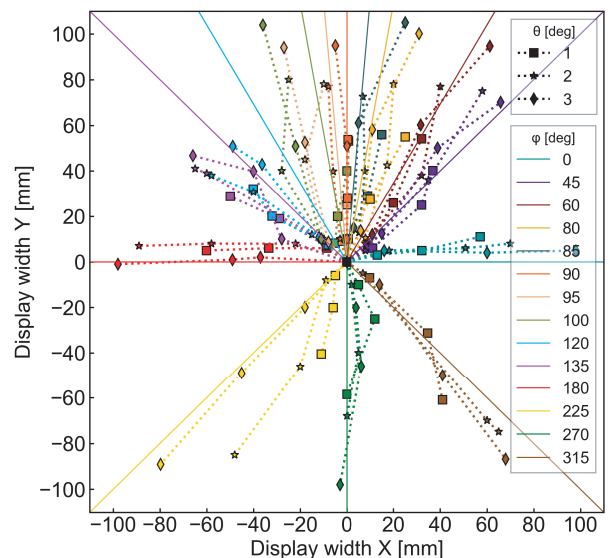


図 10 軌道の傾斜変化

Fig. 10 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、板面のコーティングにムラが生じ、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 [24] ことが知られている。短い時間間隔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よっても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  $t = 0, 30, 90, 270, 570, 1,170, 2,070, 3,870$  秒に、実験 1 と同様に連続する 5 つの気泡が射出し、それぞれ 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 11 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。 $t = 90$  秒までは、気泡は、前後の軌道で 1, 2 mm 程度の違いとなった。 $t = 270$  秒では、終端での移動スピードの低下が観察された。 $t = 570$  秒からは、



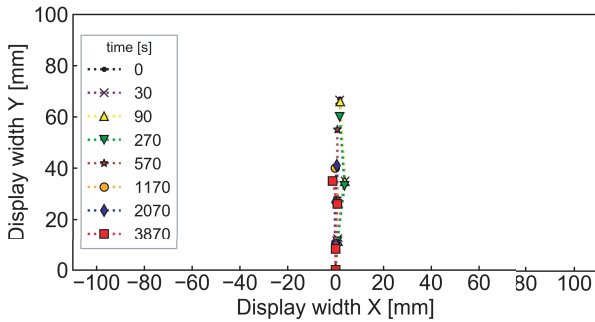


図 11 軌道の時間変化

Fig. 11 Time variation of bubble trajectory.

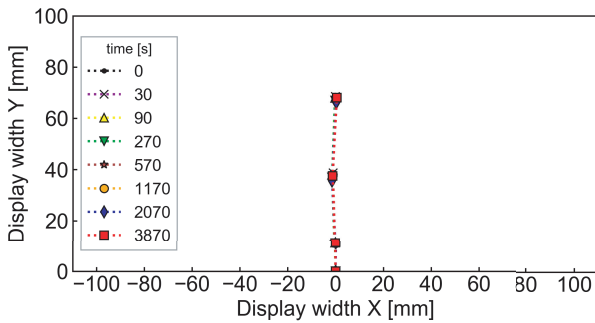


図 12 軌道の時間変化の固定

Fig. 12 Fixing time variation of bubble trajectory.

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、 $t = 1,170$  秒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、気泡はつねに一定の軌道で移動する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 12 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。定期的な超撥水面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

表 1 気泡の位置の標準偏差

Table 1 Standard deviation of bubble position.

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

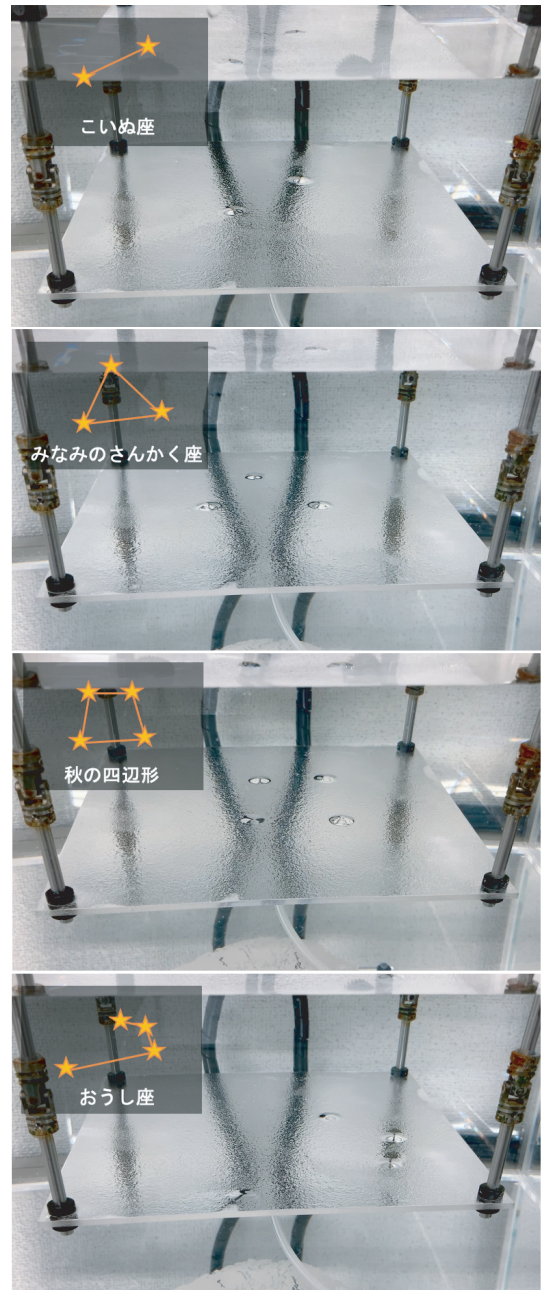


図 13 気泡で描いた図形の例

Fig. 13 Sample shapes drawn with bubbles.

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。

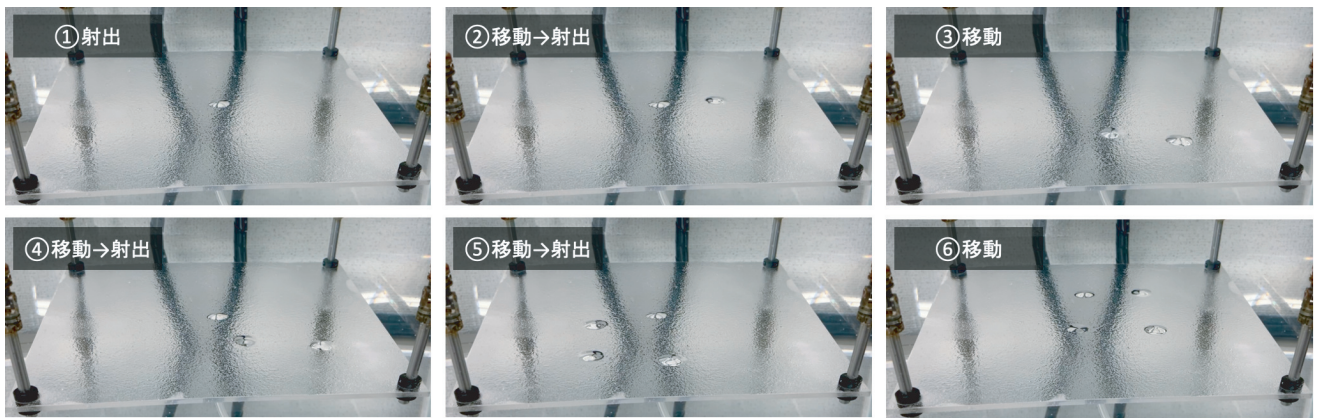


図 14 描画過程

Fig. 14 Drawing process.

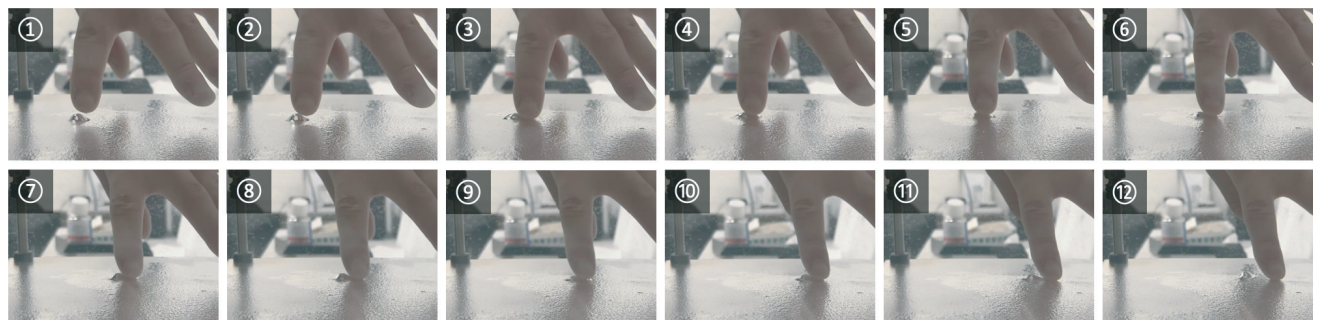


図 15 指による気泡の操作

Fig. 15 Manipulation of a bubble by the finger.

## 6. 図形の描画とインタラクション

検証実験で得られた知見をもとに、気泡で描いた図形の例を図 13 に示す。超撥水コートにムラなどにより超撥水板上に形成される空気薄膜が一様ではないため、板を傾けることによる気泡の移動特性は、板全体で均一とはならない。また、気泡間の距離が 1.5 cm 以下になると気泡どうしが結び付いたり、それにより気泡の体積が増加して板から離れてしまう現象も確認され、プロトタイプで指示した位置に気泡を配置できるのは、気泡数が 4 個までの図形であった。気泡の場所を指定しなければ、より多くの気泡を置くことが可能なため、レーザ加工 [27] などによって板上に一様な超撥水構造を構成できれば、多くの気泡を用いた図形を描ける可能もあると考えられる。

例では、4 つまでの気泡で描くことが可能な図形として星座を描画した。図 13 はそれぞれ、こいぬ座、みなみさんかく座、秋の四辺形、おうし座を描画しており、描画時間と移動回数は表 2 のとおりである。利用する気泡数の増加にともない描画時間が長くなっていることが分かる。また、本描画方法では、同じ形の図形であっても大きく表示しようとする、気泡の移動距離が長くなるため描画時間が長くなる。気泡の移動回数は用いる気泡数で決定されるが、プロトタイプでは四辺形を中央に提示するために 5 回の移動が必要であった (図 14)。理論的には図 3 に示した

表 2 星座の描画結果

Table 2 Results of drawing constellation.

| 図形       | 描画時間 (秒) | 移動回数 (回) |
|----------|----------|----------|
| こいぬ座     | 1.09     | 2        |
| みなみさんかく座 | 1.35     | 3        |
| 秋の四辺形    | 5.36     | 5        |
| おうし座     | 6.03     | 5        |

とおり 4 回の移動で描画が完了するが、場所によって気泡の移動特性が異なることが影響している。

図 15 に気泡を指で移動させている様子を示す。指で気泡に触れると、気泡が指に吸い付き、操作としては気泡を引っ張るような感覚で移動させることができる。また、超撥水コートを傷つけてしまうため現時点ではあまり推奨ではないが、気泡をこすり取るように板に触れることで気泡を飛ばすことが可能で、不要な気泡を削除できる。水全体をかき混ぜることによる全除去操作も可能である。最終的には、気泡の移動や消去を組み合わせ描かれている模様を変形したり、分割したりすることを考えている。超撥水板の傾きをスティック操作で制御するコントローラも実装しており、スティックを押し込むと気泡が 1 つ射出され、スティックを倒した方向に気泡を移動させることが可能である (図 16)。

提案システムに表示される図形を見たり、水や気泡に直



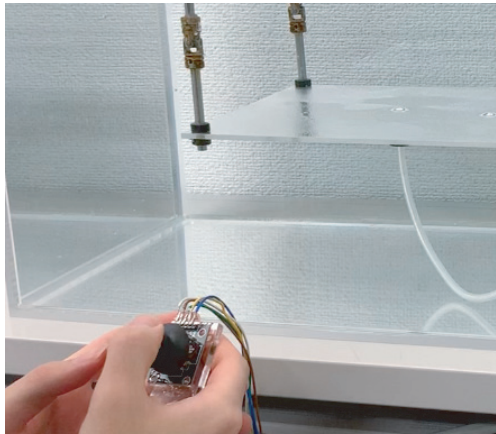


図 16 コントローラによる気泡操作

Fig. 16 Manipulation of bubbles by a controller.

接触れたり、コントローラを用いて操作するなど、成人男性 9 名に自由に体験させ、感想を収集した。表示に関しては、「ピクセル（気泡）と背景（水）が揺らいで見えるのが新鮮で綺麗に感じた」「気泡の動きに生物的な可愛さを感じた」といった気泡と水という素材から受けるポジティブな印象に関するものもあれば、「解像度が低いため情報量が少ない」「大きな点だけの表現で物足りなさを感じる」といった感想があり、解像度の向上は重要な課題の 1 つであると考えている。解像度を向上させるためには、小さな気泡を生成して移動を制御する必要があるが、小さな気泡は時間の経過とともに次第に小さくなり消えてしまう現象を確認している。これは、文献 [28] で述べられているように、気泡中の空気が超撥水面の空気膜に少しずつ拡散していることが原因と考えられ、さらなる検討が必要である。また、気泡の操作に関しては、「普通は気泡に触れてもすぐに離れてしまうのに、このシステムでは気泡に長い時間触れて動かすことができて面白い」「コントローラ操作だけでなく、手で映像に干渉できるのが面白い」「指で移動させて思ったところに気泡を置くのが難しい」「コントローラによる気泡の制御が難しいが、ゲーム的な感覚も感じる」といった感想があった。気泡に触れることに対するポジティブな感想がある一方で、気泡の操作性を向上させる必要があることも再認識された。また、コントローラを用いながら、指でも気泡に触れて操作しようとする体験者もあり、これまでのディスプレイとは異なるインタラクションが実現できる可能性があると考えている。

## 7. おわりに

本論文では、水中の気泡を用いた新しいディスプレイとして Bubble-Pixels を提案し、気泡の移動を制御する機構の設計と実装について述べた。構築したプロトタイプを用いた気泡の移動制御に関する実験では、以下の知見を得ることができ、少ない気泡であれば同時に制御して図形が描画できることを確認した。

- 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によって、気泡を目的的位置に配置し、図形を描画できる。

また、提案システムの体験したユーザからは、気泡が揺らいだり光ったりすることで綺麗に見えるといったことや機械的ではない気泡の動きに生物的な印象を受けたといったポジティブな感想を受けるとともに、表示できる情報量が少ないことや気泡の操作が容易ではないことなど、ディスプレイとしての性能を向上させる必要があることが明らかになった。

今後は、ディスプレイとしての解像度を向上させるため、超撥水板上の空気膜の安定化や生成する気泡サイズの変更などについて検討を進めるとともに、気泡に触れて実行する操作について詳細な検証を行う予定である。

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] Ishii, H. and Ullmer, B.: Tangible bits: Towards seamless interfaces between people, bits and atoms, *Proc. ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '97)*, pp.234-241 (1997).
- [2] Janzen, R. and Post, M.: Hydraulophone design considerations: Absence, displacement, and velocity-sensitive music keyboard in which each key is a water jet, *Proc. 14th Annual ACM International Conference on Multimedia*, pp.519-528 (2006).
- [3] Geurts, L. and Vanden, A.V.: Splash controllers: Game controllers involving the uncared manipulation of water, *Proc. 6th International Conference on Tangible, Embodied and Embodied Interaction (TEI '12)*, Spencer, S.N. (Ed.), pp.183-186 (2012).
- [4] Piper, B., Ratti, C. and Ishii, H.: Illuminating Clay: A 3-D Tangible Interface for Landscape Analysis, *Proc. Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '02)*, pp.20-25 (2002).
- [5] Underkoffler, J. and Ishii, H.: Illuminating Light: An Optical Design Tool with a Luminous-Tangible Interface, *Proc. CHI '98 Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.18-23 (1998).
- [6] 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)*, Vol.2, No.1, pp.16-23 (2014).
- [7] チームラボ: teamLab Planets TOKYO, 入手先 (<https://planets.teamlab.art/tokyo/jp/>) (参照 2019-12-11).
- [8] 光栄・KOEI: 施工例 (水の時計), 入手先 (<http://www.koediaquatec.co.jp/works/>) (参照 2019-12-11).
- [9] Heiner, J.M., Hudson, S.E. and Tanaka, K.: The information percolator: Ambient information display in a decorative object, *Proc. 12th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '99)*, pp.141-148 (1999).

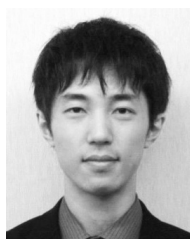
- [10] 宇川拓人, 小川剛史: Bubble-Pixels: 気泡を操作するインタラクティブ水中ディスプレイの検討, VR 学研報, Vol.24, No.CS-3, pp.77-82 (2019).
- [11] Sugihara, Y. and Tachi, S.: Water Dome-An Augmented Environment, 2000 IEEE Conference on Information Visualization, Proc. International Conference on Computer Visualization and Graphics, London, UK, pp.548-553 (2000).
- [12] Nakagaki, K., Totaro, P., Peraino, J., Shihipar, T., Akiyama, C., Shuang, Y. and Ishii, H.: HydroMorph: Shape Changing Water Membrane for Display and Interaction, Proc. 10th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI '16), pp.512-517, ACM (2016).
- [13] Eitoku, S., Tanikawa, T. and Suzuki, Y.: Display Composed of Water Drops for Filling Space with Materialized Virtual Three-dimensional Objects, Proc. IEEE VR 2006, pp.165-172 (2006).
- [14] Koike, H., Matoba, Y. and Takahashi, Y.: AquaTop display: Interactive water surface for viewing and manipulating information in a bathroom, Proc. 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces (ITS '13), pp.155-164 (2013).
- [15] 松村誠一郎, 鈴木太郎, 荒川忠一, 伊藤隆道: 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ースの新たな可能性, 環境芸術, Vol.2, pp.29-36 (2002).
- [16] Ishii, A. and Sio, I.: BubBowl: Display Vessel Using Electrolysis Bubbles in Drinkable Beverages, Proc. 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '19), pp.619-623 (2019).
- [17] Barthlott, W. and Neinhuis, C.: Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces, *Planta*, Vol.202, pp.1-8 (1997).
- [18] Gao, X. and Jiang, L.: Water-repellent legs of water striders, *Nature*, Vol.432, pp.36-36 (2004).
- [19] Atelier OMOYA Artworks: WATER LOGO '09, available from (<http://atelieromoya.jp/works/water-logo-09/>) (accessed 2019-12-11).
- [20] KAPPES: MOMENTum, available from (<https://kappes.jp/momentum>) (accessed 2019-12-11).
- [21] Kojima, Y., Aoyama, K., Itoh, Y., Fujita, K., Fujimoto, T. and Nakajima, K.: Polka dot: The garden of water spirits, *SIGGRAPH Asia 2013 Emerging Technologies (SA '13)*, Article 15, 2 pages (2013).
- [22] Umaphathi, U., Shin, P., Nakagaki, K., Leithinger, D. and Ishii, H.: Programmable Droplets for Interaction, *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '18*, pp.VS15:1-VS15:1 (2018).
- [23] Adamson, A.W. and Gast, A.P.: Physical chemistry of surfaces, *J. Electrochem. Soc.*, Vol.124, Ch.X, Sec.4 (1997).
- [24] Sakai, M., Yanagisawa, T., Nakajima, A., Kameshima, Y. and Okada, K.: 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).
- [25] Marmur, A.: Wetting on Hydrophobic Rough Surfaces: To Be Heterogeneous or Not To Be?, *Langmuir*, Vol.19, pp.8443-8448 (2003).
- [26] 只木禎力, 前田四郎: 単一オリフィスより生ずる気泡の大きさについて, 化学工学, Vol.27, No.3, pp.147-155 (1963).
- [27] 山口昌樹: フェムト秒レーザーによる超撥水表面の創製,

- FROM TECH REVIEW, Vol.26, pp.154-160 (2017).
- [28] 徳永純一郎, 延永尚志, 中谷龍男, 岩崎 徹, 福田和廣, 國武吉邦: 撥水性表面上に形成する空気膜を利用した流体摩擦抵抗の低減: 第1報矩形管内流実験および平板抵抗実験, 日本造船学会論文集, Vol.00183, pp.45-52 (1998).



宇川 拓人

2018年東京理科大学理工学部電気電子情報工学科卒業。2020年東京大学大学院学際情報学府学際情報学専攻修士課程修了。現在、ソニー株式会社勤務。



小川 剛史 (正会員)

1997年大阪大学工学部情報システム工学科卒業。1999年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。2000年同研究科博士後期課程中退後、同大学サイバーメディアセンター助手。2007年東京大学情報基盤センター講師。2010年同准教授となり、現在に至る。拡張現実感、ヒューマンインタフェース、グループウェア等に関する研究に従事。博士(情報科学)。