バブルディスプレイにおける 水の特性を考慮したインタラクション手法

佐川俊介†1,a)　　小川剛史†2,b)

概要: 筆者らは，水中に発生させた気泡に映像を投影する新しい水ディスプレイであるバブルディスプレイを提案している．バブルディスプレイは，かき混ぜる，波を起こすといった水に対する特有の動作をユーザが行い，気泡の動きや形状を変化させることで投影される映像が切り替える．これにより，ユーザと映像とのインタラクションを可能にするシステムである．これまでに，遮蔽板を用いて水中の気泡群の形状を任意に変化させる操作である「変形」を実装し，気泡群内で動くボールの移動範囲を制御するプロトタイプを構築した．本稿では，想定される複数のインタラクションの中から，新たに実装した「切断」,「かき混ぜ」について，その実現方法を述べる．「変形」,「切断」,「かき混ぜ」の三操作を組み合わせることで，さまざまなインタラクションが可能となり，バブルディスプレイのインタラクティブ性を向上できる．

Interaction Techniques Based on Properties of Water for the Bubble Display

SHUNSUKE SAGAWA†1,a)　TAKEFUMI OGAWA†2,b)

1. はじめに

Web やゲームを始めとする従来のデジタルコンテンツの多くは，マウス，キーボードなどで操作し，液晶ディスプレイで表示する形態が主流であった．しかし，デジタル技術の発達により，コンテンツの適用領域が広告やライブイベント，インタラクティブアートなど多岐に拡がり，それぞれのコンテンツに特化したインタフェースも多く見受けられるようなった．需要が拡大し，より創造性豊かな表現が要求される中で，必要とされるツールもまた汎用性に縛られない，多種多様な形態に変化している．その中でも，新たな表現方法として注目されているのが水を媒体としたディスプレイである．水ディスプレイのひとつであるフォグスクリーンは，既にアミューズメント施設や海上イベントなどのエンターテインメント分野で実用化されており，落下する水滴を制御し模様を描くスペースプリンター[1]は，駅前などのパブリックスペースに設置されている．これらのディスプレイは省エネルギーで大規模な演出が可能なほか，水には触れることで，感触や温度など多感覚に訴えかけることも可能である．何より水が持つ神秘性や幻想性により，映し出される映像が人に与える印象は既存のディスプレイとは大きく異なる．他にも水ディスプレイは

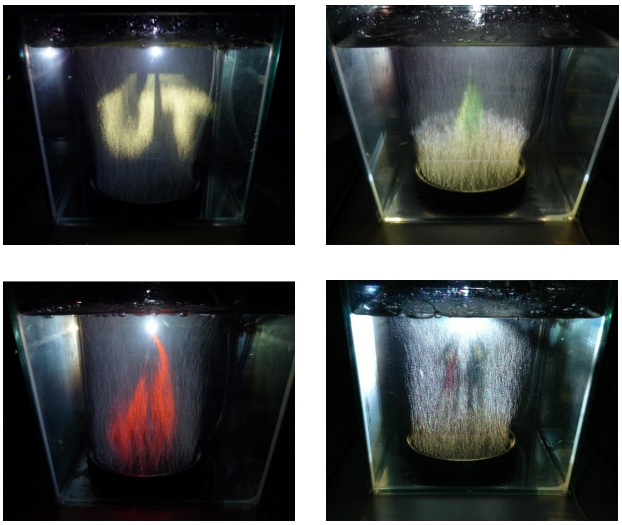


図１　バブルディスプレイ

下記のような特長をもつ．
1)水の透過性を利用した透過型ディスプレイである．
2)形状・サイズに制限がなく，大規模な演出が可能である．
3)人に対する安全性，周辺環境への親和性が高い．
そこで筆者らは，従来の水ディスプレイとは異なり，水中に発生させた気泡に映像を投影する新しい水ディスプレイであるバブルディスプレイ（図１）を提案し[2]，構築を進めている．バブルディスプレイでは水をかき混ぜる，波を起こすといった水に対する特有の動作に注目している．これらの動作をユーザが行い，気泡の動きや形状を変化させることで，投影される映像が切り替わり，ユーザと映像と

†1 東京大学大学院学際情報学府学際情報学専攻
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.
a) qq126313@iii.u-tokyo.ac.jp
b) ogawa@nc.u-tokyo.ac.jp

のインタラクションを可能にする点が本システムの最大の特徴である．これまでに，遮蔽板を用いて水中の気泡群の形状を任意に変化させる操作である「変形」を実装し，気泡群内で動くボールの移動範囲を制御するプロトタイプを構築した．本稿では，想定される複数のインタラクションの中から，新たに実装した「切断」,「かき混ぜ」について，その実現方法を述べる．

2. 関連研究

水を用いたディスプレイには，杉原らの“かぶり型水ディスプレイ”がある[3]．このシステムでは，流水を平板に衝突させることで水膜を生成し，その水膜に向けて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して，水に写った映像を楽しめるほか，直接触れたり，水の流れる音や香りを体感することが可能な五感で感じられるディスプレイとなっている．このように杉原らは日常生活における，人や環境と親和性の高さを最大限活かすことで，水ディスプレイの新たな可能性を見出した．一方，解像度の低さやインタラクティブ性の向上など技術的な課題は存在する．

Barnum ら[4]や，永徳ら[5]は落下する水滴が光を散乱させる特性を利用した水ディスプレイを提案している．これらのディスプレイでは，バルブを制御し，水滴を等間隔に落下させ，水滴一つ一つにプロジェクタで光を投影することで，さまざまな映像の描写を可能にしている．また文献[4]では，バルブ，カメラ，プロジェクタの同期制御により，リアルタイムに水滴の位置をトラッキングし，投影することで複数レイヤからなる 2.5 次元のディスプレイを実現している．しかし，このシステムでは同期を図るためのキャリブレーションが非常に重要であるため，設備条件が厳しく，投影できる画像の形状，サイズにも限界がある．また，手で触れることによる画面操作が可能なインタラクティブシステムを目指しているが，まだ実現には至っていない．

八木らは光の散乱が指向性をもつことを利用し，既存のフォグスクリーンでは不可能だった，立体的な映像表現を可能にしている[6]．空中に発生させたフォグに多方向から異なる映像を同時投影することで，体験者は視点位置によって様々な映像を見ることができる．その視点が移動する際に生じる運動視差により，体験者に対して立体的に映像を提示することを可能にした．これは水の透過性，光学的特性を活かした，水ディスプレイ特有の表現方法と言え，筆者らが一つの目標としている多方向映像提示によるグループウェアシステムとも関連が深く，非常に興味深い．

水そのものではなく，水中の気泡を利用した例として，松村らによる“Water Canvas”や“Liquid Sculpture”などがある[7]．“Water Canvas”は，水槽内に発生した気泡で模様を描くディスプレイである．発生する気泡は水槽の底に設置された流量バルブを制御し，上昇する気泡のみで二次元的な視覚表現を可能にしている．また，このシステムは体験者とのインタラクティブ性も有している．体験者はキーボードによる文字入力の他に，スピーカ付きのデバイスを持ち，左右に振ることで，音源の位置が特定され，その位置に対応するバルブから気泡を発生させるという操作が可能である．松村らは，水中を上昇する気泡に注目し，これまでほとんど研究されてこなかった気泡独特の“揺らぎ”による癒しを効果的に表現した．しかし，このシステムでは表示できる情報は単純な二次元形状のみであり，ディスプレイとして汎用性が高いものとは言えない．“Liquid Sculpture”は，水槽を円柱状にすることで三次元的な表現を可能にしているが,気泡の空間的配置のみで模様が描かれているという点は変わらず，“Water Canvas”と同様に，表現できる情報には大きな制限がある．

3. システム

3.1 水中の気泡への投影

本システムの概略図を図 2 に示す．200×200×200mm の立方体ガラス水槽に直径 132mm の市販のエアストーンと水道水を入れ，エアポンプによって空気を送り，気泡を発生させる．エアポンプは吐出流量が毎分約 2 リットルのものを使用している．この発生した気泡に対し，住友スリーエム社製，明るさ 12 ルーメンのポケットプロジェクタを用いて背面から映像を投影する．また，同プロジェクタ上部にカメラを固定しリアルタイムで気泡の形状を取得する．図 3 に，実際に気泡へ映像を投影した様子を示す．図 3(a)が今回投影した，黒地に黄色の文字で「UT」書いた画像である．図 3(b)は前面から気泡を見た場合であり，気泡に画像が鮮明に写し出されており，まるで宙に浮いているような印象を受ける．図 3(c)は側面から気泡を見た場合であり，気泡部分が少し色づいている以外にはほとんど何も見えない．図 3(d)は背面であるプロジェクタ側から気泡を見た場合であり，僅かながら水槽壁面に映像が映し出されている．しかし，気泡部分には全く映像は投影されていない．つまり，本ディスプレイはプロジェクタに対して正面から見た気泡部分にのみ映像が映し出される，指向性の強いディスプレイと言える．これは文献[4]や文献[5]，文献[6]で提案されているディスプレイと，水と空気が逆の構造ではあるが，同様な役割を果たしている．十分に小さい透明な気泡へ投影された光は，大部分が反射せずに透過し，通り抜ける過程で光を散乱させる．そのため，気泡はレンズのような役割を果たし，まるで自らが発光しているかのように見えるようになり，気泡一つ一つがドット一つに対応するように，気泡が集まることでディスプレイとしての機能を果たしている．

3.2 気泡群の抽出

本システムではディスプレイにインタラクティブ性をもたせることを目的としているため，発生した気泡のトラッ

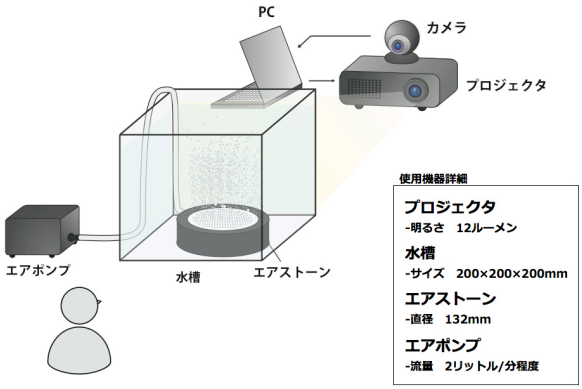
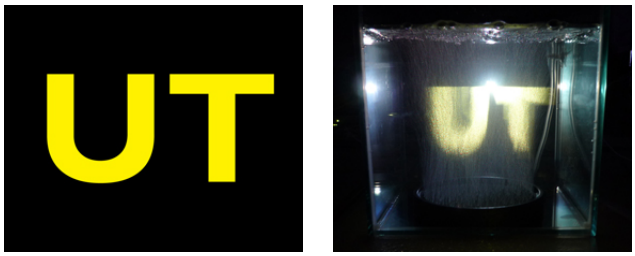
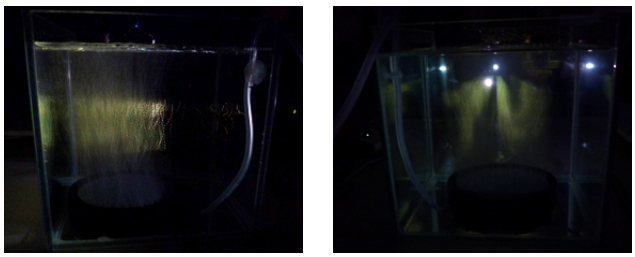


図 2　システム概略図



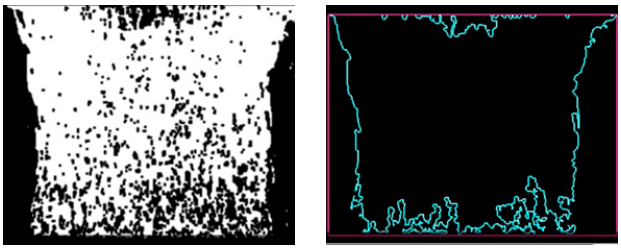
(a)　投影画像　　(b)　正面から見た画像



(c)　側面から見た場合　　(d)　背面から見た場合

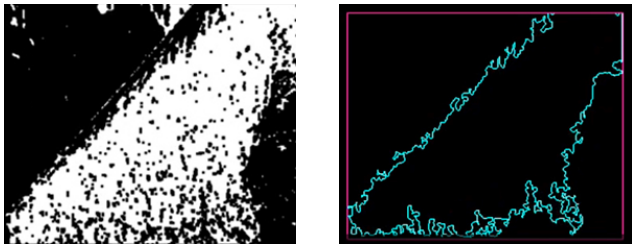
図 3　各方向から見た投影画像

キングを行い，その形状や動きに応じて画像を切り換える必要がある．そのため，OpenCV にてフレーム間の差分を取得し，気泡群を検出する．気泡の映像はプロジェクタ上に固定したカメラから毎秒 30 フレームで取得する．取得した映像から毎フレーム，1 フレーム前の画像と現在のフレームの画像との差分絶対値を取り，設定した閾値で二値化することで，リアルタイムで動いている気泡群の輪郭を抽出した．図 4 に得られた画像を示す．図 4(a)は 1 フレーム前との差分を二値化して得られた画像である．図 4(b)はその画像から輪郭線を描画した画像である．また，気泡群の形状を変化させる目的で，水の中に透明なプラスチック板を斜めに挿入し，発生した気泡の上昇する方向を制限することで気泡群の形状を三角形に変化させた．その時，得られた画像を図 5 に示す．図 4 と同様に，図 5(a)が差分を二値化して得た画像であり，図 5(b)がその輪郭線を描画した画像である．



(a)　二値化した画像　　(b)　輪郭を抽出した画像

図 4　発生した気泡群形状の抽出



(a)　二値化した画像　　(b)　輪郭を抽出した画像

図 5　透明プラスチック板で
気泡群の形状を変化させた場合

4.　インタラクション

4.1　水ディスプレイにおけるインタラクション

水中で発生した気泡は独特の揺らぎをもちながら浮力によって上昇し，水面にて破裂する．この一連の動作過程で，水中の気泡に対しユーザがさまざまなインタラクションを起こすことで，リアルタイムに投影される映像が変化する．この章では，本システムで実装した，「変形」，「切断」，「かき混ぜ」の 3 つのインタラクション手法について説明する．想定されるインタラクションは他にも存在するが，今回実装した 3 つの手法は水の特性を活かした基本的なものである．より複雑なものに関しては，今後，この 3 つのインタラクションを応用・組み合わせることで実現が可能になると考えている．

4.2　変形

「変形」によるインタラクションとは透明プラスチック板を使い，気泡群を任意の形状に変化させることである．このインタラクションでは気泡群の全体形状に着目している．バブルストーンから発生した気泡はあらゆる方向に揺らぎながら上昇し，気泡群は台形に近い形状を形成するが，ユーザは上昇する経路を透明板で遮断することで，気泡群を異なる形状に変えることができ，その変化に応じて映像が切り替わる．「変形」のインタラクションコンテンツ例を図 6 に示す．投影する映像は赤いボールで，バウンドを繰り返しながら，気泡群内を自由に動くアニメーションを設定している．この映像に対し，ユーザは任意の角度で遮蔽板を挿入することで，ボールの動く範囲を変えることができる．図 7 が実際にインタラクションしている様子である．

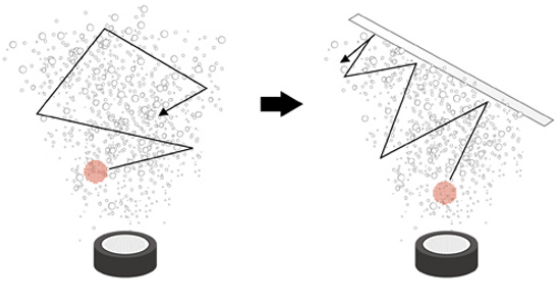


図 6　想定している変形インタラクション

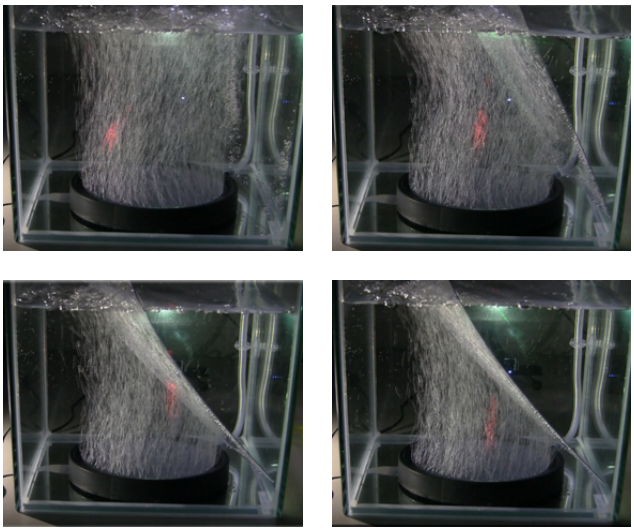


図 7　変形インタラクションの様子

4.3 切断

「切断」によるインタラクションとは透明板を使い，気泡群を二つ以上に分割させることである．このインタラクションでは気泡群の数に着目している．通常，気泡は一つの大きな気泡群を形成するため，認識される輪郭は一つであるが，気泡群を分割し，複数の輪郭が認識することで，個々の気泡群に対し，独立した映像を投影することが可能である．映像は，切断された個々の気泡群の輪郭に収まるように，適切な大きさ，位置に投影している．また切断を解除，つまり透明板を取り除き，気泡群を一つに統合すると，元の一つの映像として機能する．「切断」のインタラクションコンテンツ例を図 8 に示す．通常時はりんごのイラストが投影されているが，ユーザが任意の位置に透明板を挿入，気泡群を切断することにより，それぞれの気泡群にはカットされたりんごが映し出される．図 9 が実際にインタラクションしている様子である．図 9(a)では，一つの大きな気泡群が認識されているが，図 9(b)では透明版を中央に挿入したことにより，認識された気泡群が二つになっている．対応するように投影される映像も切り替わっている．図 9(c)，図 9(d)は実際に投影された映像の様子である．

4.4 かき混ぜ

「かき混ぜ」によるインタラクションとは，指や透明板などで水中をかき混ぜることで波を作り出し，上昇する気泡を四方へ拡散させることである．このインタラクションでは気泡群の動きに着目している．これらの動きを画像処理で検知し全体の気泡の流れを捉えることで，動きに応じた映像を投影すること可能である．図 10 に想定しているインタラクションコンテンツ例を示す．通常時はクラゲ浮いている映像が投影されているが，指でかき混ぜることで気泡が吹き飛び，その方向へクラゲも移動する．その際，流れの強さによって速度や揺れも変わる．気泡の動き検出にはオプティカルフローを用いる．オプティカルフローとは，画像の輝度値に基づいて各点の速度ベクトルを計算し，物体のフローを検出する手法であり，実装では，勾配法の中の Lucas-Kanade 法を用いた．検出の様子を図 11 に示す．図 11(a)は気泡を発生させる前，図 11(b)はエアポンプから発生した気泡が上昇するだけの通常時，図 11(c)は透明版を挿入し，気泡の上昇を遮った時，図 11(d)は波をおこし気泡を曲げた時，それぞれのフローの様子である．気泡は常に上昇するため，何もしていない状態の時でも上方向へのベクトルが検出される．そのため，インタラクション時には，得られたベクトル場から通常時のベクトル場の差分を取得することで，ユーザが意図的に起こした動きのみを求める必要がある．

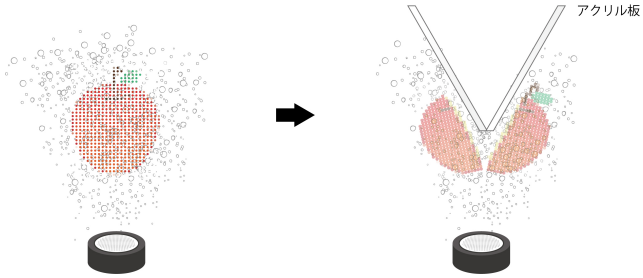
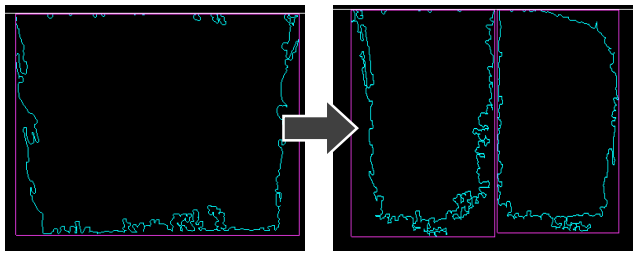
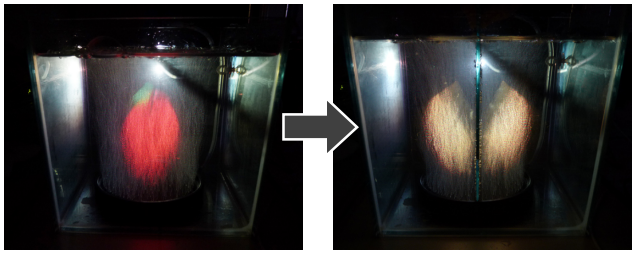


図 8　想定している切断インタラクション



(a) 通常時輪郭線（気泡群 1 つ）　(b) 切断時輪郭線（気泡群 2 つ）



(c) 通常時の投影様子　(d)切断時の投影様子

図 9　切断インタラクションの様子

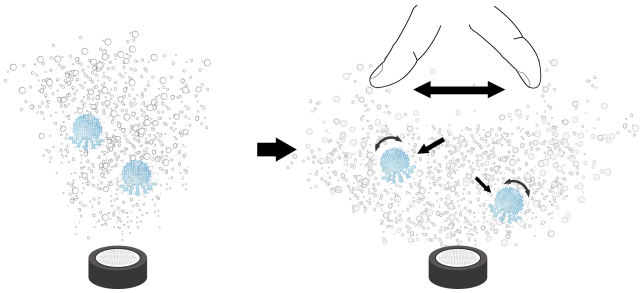
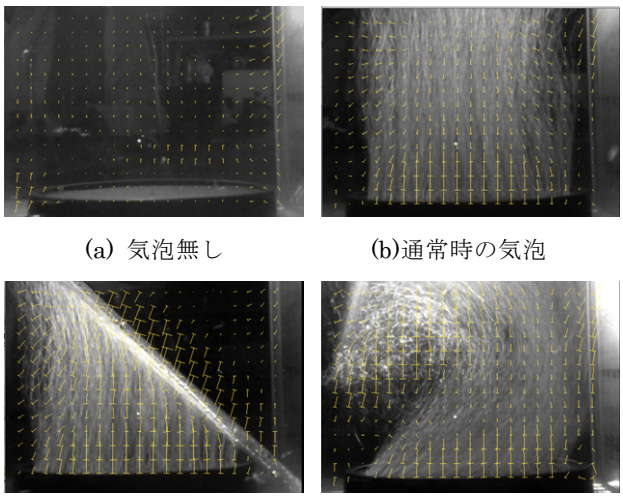


図 10　想定しているかき混ぜインタラクション



(a) 気泡無し　(b)通常時の気泡

(c) 遮蔽版有り　(d)波を起こした時

図 11　オプティカルフローによる検出結果

5. 考察

今回実装したシステムは，気泡群の形状，数，動きの三つの要素に注目した基本的なインタラクションであり，現システムで利用できるコンテンツは限定されたものが多い．今後は，この三つ要素を組み合わせることによって，より複雑なインタラクションの実現を目指す．

現在のシステムでは，二次元的に映像を取得しているため，「変形」，「切断」によるインタラクションの際，カメラに対して平行に透明板を挿入しなければ，投影する映像にズレが生じてしまう．「かき混ぜ」の際も同様で，検出できるフローは二次元方向のベクトルのみであり，前後方向の動き考慮できていないため，投影できるコンテンツには大きな制限がある．バブルディスプレイが持つ，立体感や気泡の揺らぎを最大限に活かすためには，複数台のカメラを用いた三次元的な気泡群の検出が必要である．複数台カメラでの処理は，我々が目指す多方向映像投影においても必要となるため，今後の大きな課題となると言える．また，現在のフロー検出では，背景ノイズや気泡の細かさに対応できておらず，精度の高い検出は望めない．より複雑の流体の動きを取得するためには，アルゴリズムの最適化だけではなく，オプティカルフロー以外の検出方法を採用することも検討したい．

また，水槽や気泡発生方法についても改善の余地が見込まれる．現在の水槽サイズでは，ユーザがインタラクションを行う際，片手の手首をスナップさせる程度の動作しかできない．操作性の向上，投影映像の拡大のためにもシステム全体のスケールアップが望まれる．その際，気泡発生方法に関しても，現在の単一のエアストーンではなく，グリッド状に細分化したエアストーンを敷き詰め，気泡が発生位置を制御したい．プロジェクタ，カメラに加え，エアストーンでの同時処理が可能になれば，より複雑なインタラクションや 3D 映像の表現も可能になると考えられる．

6. まとめ

本稿では，バブルディスプレイでのインタラクティブ性の向上のため，既実装の「変形」に加え，新たに「切断」，「かき混ぜ」によるインタラクションを実装した．「切断」に関しては，複数個の気泡群を同時に取得し，それぞれの気泡群の形状，位置に応じた映像投影を行った．「かき混ぜ」に関しては，先の二つのインタラクションとは異なる，オプティカルフローによる気泡のフロー検出を行い，気泡の動きに応じた映像投影が可能になった．今後は，現在のシステムの三つの要素を組み合わせ，より複雑な操作を実現すると共に，フロー検出の精度を高める必要がある．また，複数台カメラを用いることで，現在のインタラクションを三次元に拡張することを目指す予定である．

謝辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究（C）（25330227）の研究助成によるものである．ここに記して謝意を表す．

参考文献

1)　光栄 最新技術 http://www.koeiaquatec.co.jp/index.php?data=./data/cl2/ (2012.5.15 確認)

2)　佐川俊介，小川剛史: “映像とのインタラクションを可能にするバブルディスプレイの提案”，*情報処理学会研究報告*, Vol.2013-DCC-3, No.13 (2013)

3)　杉原有紀，舘暲: “かぶり型水ディスプレイの開発”，*日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.6, No.2, pp.145-152 (2001).

4)　Barnum,P. C., Narasimhan,S. G., and Kanade, T: “A Multi-Layered Display with Water Drops,” *ACM Trans. Graph.* Vol.29, Issue 4, Article 76 (2010).

5)　Eitoku, S., Nishimura, K., Tanikawa, T., and Hirose, M.: “Study on Design of Controllable Particle Display Using Water Drops Suitable for Light Environment,” *Proc. of the 16th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp.23-26 (2009).

6)　八木明日華，井村誠孝，黒田嘉宏，大城理: “多視点観察可能なフォグディスプレイ”，*情報処理学会インタラクション 2011*, 1INH-5, (2011).

7)　松村誠一郎，鈴木太朗，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，” *環境芸術学会論文集*, Vol.2, pp.29-36 (2002).