

BelliesWave: ゴムの膨張収縮制御による変色するピクセルの提案

野尻 風香^{1,a)} 笥 康明^{1,b)}

概要: 本研究では、ゴム素材をピクセルとして用いた新しい実体ディスプレイを提案する。色の異なる二層のゴム膜を空気により膨張・収縮させ、その体積と表面の色彩混合を制御することにより、光によらない素材そのものの変色によって情報を表現する実体ピクセルを開発した。また、これらを多数個アレイ状に並べ、多様なパターンを表現することの可能な実体ディスプレイ BelliesWave を試作した。本稿では、このシステムの概要および設計と実装、アプリケーション展望について述べる。

キーワード: 実体ディスプレイ, 色彩, 発色, ゴム, インタフェース

BelliesWave: Shape and Color Controlled Pixels Using Rubber Material

FUKA NOJIRI^{1,a)} YASUAKI KAKEHI^{1,b)}

Abstract: In this paper, we propose novel dynamic pixels using rubber material. This system has substantial rubber sheets, which can express both volume and color information by using their materiality. Through air control, each rubber sheet inflates and deflates like a balloon, presenting various information. In addition, We have arranged 19 pixels on a plane and developed a new display system BelliesWave.

1. はじめに

我々が日常的に触れるディスプレイの多くは、発光するピクセルを平面上に多数並べることで精細な情報を表す、平面的なものである。4K 解像度ディスプレイの登場などが示す通り、高い解像度における、高速で美しい情報の表現が追求され続けている。しかし、これらの平面的なディスプレイに表現されているコンテンツと、それを鑑賞する我々の身体との間には、物理的な隔りがあり、画面の中のコンテンツに対し、質感や大きさ等を実感しつつ、物質的にアクセスすることは難しい。

ディスプレイと人の身体との距離感を近づけるための試みとして、触れることのできる立体としての「実体」を有す



図 1 BelliesWave(マルチカラー)

Fig. 1 The multicolor version of BelliesWave.

るディスプレイおよびピクセルの研究が進められている。実体を持つディスプレイは、三次元情報を実体によって表現することができる。また、動的な動きを伴った情報表現

¹ 慶應義塾大学 環境情報学部
Faculty of Environment and Information Studies, Keio University

^{a)} t11721fn@sfc.keio.ac.jp

^{b)} ykakehi@sfc.keio.ac.jp

や、光を用いない発色による色彩表現の可能性もある。そのため、より実世界における物体に近い状態で、コンテンツやオブジェクトを表現することができる。また、ディスプレイとしてだけでなく、様々なインタラクションを内包するインタフェースとしての応用にも期待できる。ディスプレイの実体として用いることのできるマテリアルは非常に多様である。それぞれの素材が持つ特性を巧みに利用することで、その素材にしか適用できない表現手法を得られる。これらをディスプレイのピクセルとして用いることによって、実体ディスプレイは全く新しい情報提示を実現している。

素材特性を活かした実体ディスプレイの開発の流れのもと、本研究では、新たにゴムという素材に着目した。ゴム素材は我々にとって身近な素材の1つであるが、中でも、風船は特に身近なゴム素材である。風船は丸い形状、様々な色のバリエーションを持ち、玩具、装飾やバルーンアートなどとして用いられるほか、膨らませる・弾ませるなどといった遊びを通し、老若男女に親しまれている。本研究では、風船の丸い形状や、風船が膨らむという動作に着目し、人が「触れたい」と感じるような実体ピクセルを作成することを試みた。

具体的には、平面サーフェス上に埋め込まれたゴム膜を、空気により膨張させることによって、あたかも風船がサーフェスから飛び出してくるかのような実体ピクセルを開発した。また、色の異なる二層を持つゴム膜を膨張させると、二層の色が混ざり合い、徐々に色が変化して見える現象を利用し、ピクセルの膨張に伴い変色させた。さらに、このピクセルを多数個並べ、多様なパターンや色彩を表現する動的な実体ディスプレイ *BelliesWave* を試作した。*BelliesWave* は、渦巻きやウェーブなどの動的なパターンを、色彩の変化とともに表示することができる。各々のゴム膜ピクセルはその膨張に伴い、デジタルにおける0,1の表現ではなく、グラデーション状に表面色を変化させていく。

以下、本稿では上記のようなゴム膜を用いたディスプレイシステムに関する検討・設計および実装、また本システムを応用した表現例について述べる。

2. 関連研究

2.1 実体ディスプレイ

実体ディスプレイの代表例として、*Wooden Mirror*[1] が挙げられる。これは、木材という身近な素材を用いて、実体に情報を纏わせることに成功している。*inFORM*[2] では、空気圧により上下運動する白色のバーを多数アレイ状に並べ、プロジェクションを併用して、高さや体積の情報を平面情報と併せ持つボリュームメトリックなディスプレイを提案している。これらは実体による立体的な情報提示を可能としているが、ピクセルを動的に動かす物理的な仕組み

に重点が置かれており、各ピクセルの構成要素としての素材自体は静的である。

素材特性を利用した実体ディスプレイの例としては、シャボン玉を利用した *Shaboned Display*[3] や *Photochromic Sculpture*[4] などが挙げられる。*Shaboned Display* では触れる、割るなどといったシャボン玉特有の動きとアフオーダンスを表現に取り入れているが、素材自体は透明でありその変色を積極的にコントロールすることは難しい。*Photochromic Sculpture* は、紫外線照射による素材の発色を利用したボリュームメトリックディスプレイであるが、用いられる素材は平面的であり、ピクセルそのものの触感や形状変化に乏しい。

これらに対して本研究では、従来の実体ディスプレイが可能にしてきた立体表現に加え、プロジェクションに頼らない素材そのものの発色を利用した情報表現を可能にする。また、ゴム素材のもつ柔軟性から生まれる、「触れたい」と思わせるアフオーダンスを有効に利用したインタラクションも検討する。

2.2 バルーン素材を用いたディスプレイおよびインタラクション

バルーンおよびゴムなど、膨張収縮する素材を表現に利用した作品は既にいくつか存在している。中でも、実用性を重視した例としては、空気圧を検知するバルーンを用い、それらを組み合わせて体積を制御することで、ボリュームを持った様々な形状をバーチャル表現する機構を岩田らが提案している[5]。また、Stevensonらは、膨張収縮するディスプレイに裏側から映像を投影し、半球状の情報を表現するタッチディスプレイを開発している[6]。これらの研究は、バルーン素材が様々な形状を表現することに適したマテリアルであることを示す例である。

One hundred and eight[7] は、ビニール袋を108個アレイ状に並べ、ファンで膨張収縮を制御することで、ゆるやかな時間のなかで個々からディスプレイ全体の形を変容させていく表現を実現している。また、風船そのものをセンサやアクチュエータとして利用したインタラクションの例も存在する。人間の呼吸と集中度に応じて膨張する *Interactonia Balloon*[8] や、叩く・抱く・撫でるといった風船への行為をセンシングする *EmoBalloon*[9] が開発されている。風船やバルーン素材の持つ魅力として、膨らむ・萎む動作が出来る点が挙げられる。膨らむ・萎むという動作は生物の呼吸や心拍のリズムに類似したものを我々にイメージさせ、上記のような表現や入力手法に用いられるきっかけとなっていると考えられる。本研究も、そのようなバルーン素材の持つ「膨らむ・萎む」という動作を重要なアクチュエーションとして利用する。さらに、二層構造を持つバルーン素材を用いることで、変色の特性を取り込んだディスプレイを提案する。

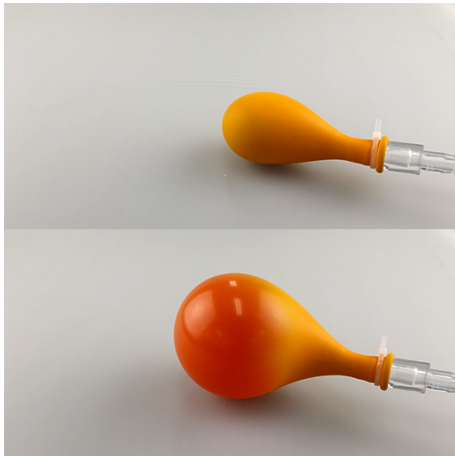


図 2 徐々に変色する風船

Fig. 2 The balloon that changes its color gradually.

3. ゴム素材を用いた実体ピクセルの実装

3.1 システム概要

本研究では、ゴム膜を素材として用い、形状の変化に伴って変色する新しい実体ピクセルを提案する。これを実現するために、膨らませると徐々に色が変わるゴム膜を各ピクセルの構成要素として用いる(図2)。このゴム膜に空気を送り込み膨張あるいは収縮させることにより、システムが積極的にその変色をコントロールすることができる。

ゴム膜を用いたピクセルは、膨らんでいない状態では、単なるフラットな平面なのである(図8左)。空気を送り込むことにより、初めて立体形状を帯びていく。したがって、テーブルや壁面など、身の回りのサーフェスに埋め込むことが容易である。また、ゴム膜の表裏の色を選択することで、膨張時に様々な表面色彩の変化を持たせることが可能となる。このような実体ピクセルの実装にあたり、いくつかの機構を製作した。以下、それらの機構の設計および実装について述べる。

3.2 二層のゴム膜の設計と実装

前述の通り、本研究における実体ピクセルの素材としては、膨らませると色を徐々に変化させる風船(“ヘンシンバルーン”[10])を使用した(図3)。

この風船は、色の異なる二層のゴム膜を持ち、膨らませない平常時は表面の色のみが露出している。しかし、これを膨らませると、徐々に裏面の色が透過し、表面の色と混ざり合っ見えるようになる。例えば、表面が青色で、裏面が黄色となっている風船は、膨らむにつれて青色と黄色が混ざり、徐々に緑色へと変化していく。これらをゴム膜として用いた場合も、密閉状態にて空気を送り込むことで、同様の色彩変化を表現することが可能である。膨張時には、ピクセルの体積に応じて表面の色彩も変化していく。体積をコントロールすることによって、ピクセルの色彩を



図 3 ヘンシンバルーン

Fig. 3 Hen-shin Balloon.

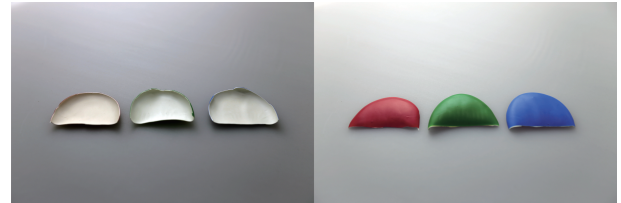


図 4 風船を切り取った二層のゴム膜

Fig. 4 Two-layered rubber sheets cut from the balloon.

精細に変化させることができる。

二層のゴム膜は、その二色の組み合わせによって、様々な色の変化を表現できる。黄色と青色の組み合わせでは、膨張した際に緑色を、黄色と赤色の組み合わせでは橙色、青色と赤色の組み合わせでは紫色を発色する。また、二層における一方の色を白色にし、他方の色を原色にすることによって、白色から様々な色に変色するゴム膜ピクセルを作成可能であることも分かった。このような色彩のパターンを持つゴム膜は自作も可能であるが、今回は市販の特殊な風船を用いて実装している。

3.3 ゴム膜の膨張収縮制御機構の設計と実装

ゴム膜素材の膨張収縮を制御するための機構について触れる。まず、二層の膜を持つゴム膜をドラム状のデバイスに張った状態で取り付ける。この機構は、ゴム膜を平常時フラットな状態に保ち、完全に密閉するための機構である。この密閉機構に、裏側からエアーポンプで空気を送り込む。

空気を送り込むとゴム膜は伸張された状態から、高速に膨張・収縮をはじめめる。また、エアーポンプからゴム膜の間にはピンチバルブを噛ませ、適宜空気を追い出すための機構も用意する。これにより、ピクセルは膨張するだけでなく、空気を抜かれることによって本来のフラットな状態、および元の色彩へ戻ることができる。シンプルな機構であるが、ピクセルの体積と色彩の可逆性を実現している(図5, 図6)。

具体的には、エアーポンプおよびピンチバルブは、マイクロコンピュータから MOS-FET に信号を送ることによって、電流をスイッチングし、ON/OFF した。エアーポンプの ON/OFF とピンチバルブの開閉の組み合わせにより、

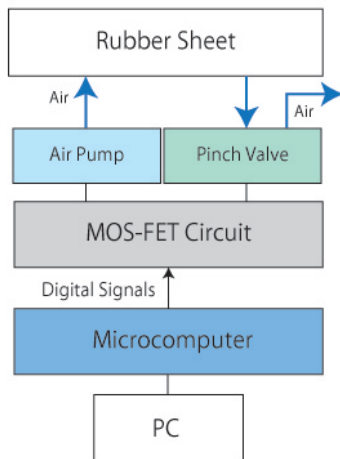


図 5 システム概要
Fig. 5 System overview.

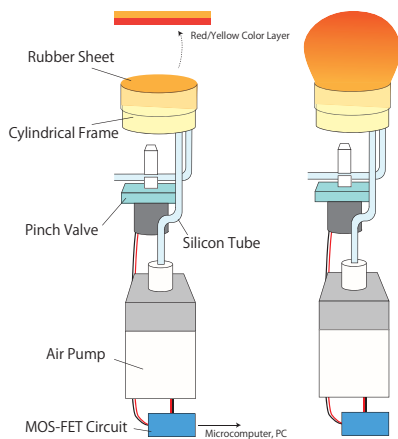


図 6 ゴム膜機構
Fig. 6 Mechanism for controlling rubber pixels.

ゴム膜の膨張・収縮にいくつかの動きをつけることが可能となる。具体的な制御のパターンとして、(1) 収縮時にピンチバルブ、ポンプともに ON とすることで膨張する動作、(2) 膨張時にピンチバルブ、ポンプともに OFF することで、急激に収縮し、フラットな状態に戻る動作、(3) 膨張時にピンチバルブのみを OFF することで徐々に収縮する動作、および (4) ピンチバルブのみを ON することで膨張後、体積をとどめ停止した状態を表現することができる。

ポンプを継続して駆動させる時間は、FET にデジタル信号を送り続ける時間を OpenFrameworks 上のソフトウェアで設定することによって細かく制御した。具体的には、1 ミリ秒間からポンプを継続駆動させることができる。膨張させる体積は、ポンプの駆動時間によって調整した。次項にて、ポンプの制御によるピクセルの体積・色彩制御の精度についての実験と結果を記す。

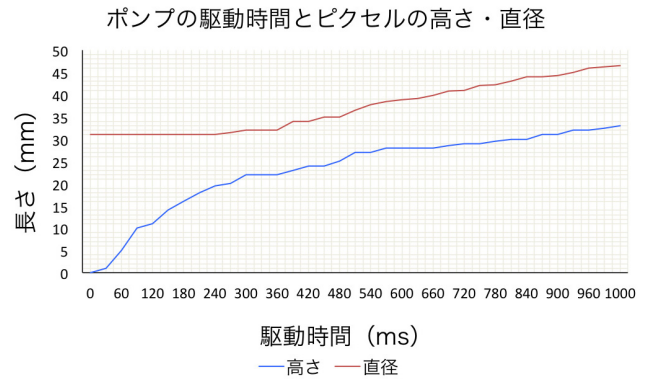


図 7 ポンプの駆動時間とピクセルの高さ・直径の推移
Fig. 7 Height and diameter of a pixel according to the running time of the air pump.

3.4 ピクセルの体積と色彩の同期に関する実験

空気によるゴム膜の膨張の制御と、実際に提示される色彩や体積の精度について検証するため、評価実験を行なった。ピクセル1つを自在に膨張させる事のできる、完全に密閉したユニットを作製し、これを用い、ピクセルが約1秒間膨張する間の、色彩と大きさの推移を調べた。

ポンプは応研精工のRFP32B03Rを用いた。無負荷状態での空気の吐出量は毎分3.8Lで、1秒間に約63mLの空気を送り込むことが出来る。ただし、実際には、ゴム膜の厚みや密閉による内圧の影響を受け、1秒間でピクセル内に充填される空気の体積は63mLを下回っていると考えられる。そのため、ピクセルの体積を示す指標としては、膨張前と比較したピクセルの高さ、直径を測定し利用した。

また、色彩の測定には、コニカミノルタ社の色彩輝度計CS-100Aを用いた。ピクセル上部から約15cm真上の位置に、輝度計のレンズ部がくるよう固定し、一定の室内光のもとで、ピクセル中央部の輝度と色彩を測定した。測定にあたって、ピクセルを30ミリ秒ずつ1秒間まで膨張させ、それぞれの時刻での各値を記録した。その後、横軸を時間、縦軸を測定値として、それぞれグラフにプロットした。

まず、ポンプの駆動時間（膨張させた時間）とピクセルの高さおよび直径の推移を示したグラフが図7である。ピクセルの直径は、およそ240ミリ秒～300ミリ秒前後で増加をはじめた。ゴム膜の中央部分だけでなく、周縁の部分も膨張を始め、密閉機構のフレームを飛び出し始めた時刻であると考えられる。直径が広がり始めるにつれ、ピクセルの高さがゆるやかに推移し始めることもグラフから読み取れる。1秒間の中で、ピクセルの高さは約30mmへ、また直径は約30mmから約45mmへ推移した。高さや直径の制御が非常に高速に行えることが検証できた。

また、膨張時間とピクセルの色彩の推移を示したグラフが図9である。今回は、アイボリーに近い白色から、青色へ色を変化させるゴム膜を使用し、徐々に青くなる色彩の変化を数値的に測定した。

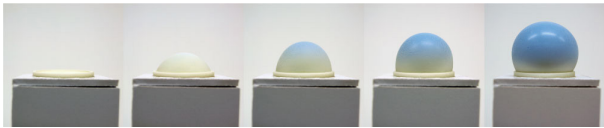


図 8 高さの推移 (写真)
Fig. 8 Transition of height.

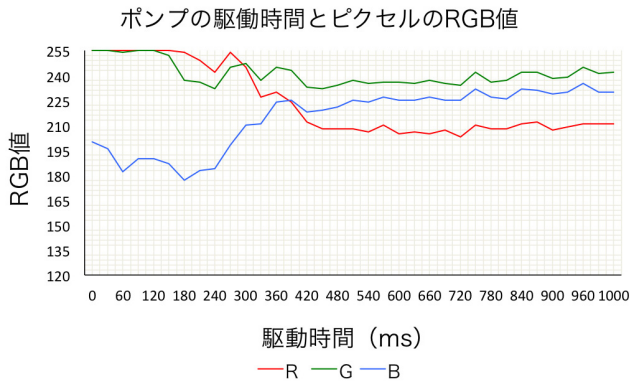


図 9 ポンプの駆動時間とピクセルの RGB 値の推移
Fig. 9 RGB values of a pixel according to the running time of the air pump.



図 10 上面の直径と色彩の推移 (写真)
Fig. 10 Transition of diameter and color.

色彩輝度計が表示する Yxy 表色系は、そのままではモニターで確認出来る色としてわかりづらい値のため、RGB 表色系での値に変換した。

グラフによると、およそ 120 ミリ秒後には RGB の値の変化が始まっており、空気の注入開始から非常に短時間で色彩が変化し始めることが読み取れる。変化中は、R の値が急激に減少すると同時に、B の値が増加しており、徐々に青く変色する過程が数値によっても再現することが出来た。0.4 秒ほど経過後は、R,G,B の値はほぼ横ばいになり、輝度の変化だけがあらわれている。

実験の結果、本システムにおいて、ピクセルの色彩、および量感の制御を、非常に短い時間で行うことが可能であることが検証出来た。また、高さと同様に広げていくという、膨張特有の量感の変化もデータとして示された。

次項で述べる実体ディスプレイ BelliesWave でも、実験と同様の精度で、表現したい色彩・および量感を自在に制御することが可能である。

4. 実体ディスプレイ BelliesWave の試作

4.1 システム概要

自動的に膨張収縮するゴム膜を多数並べ、体積の変化に



図 11 BelliesWave(二色)
Fig. 11 The bicolor version of BelliesWave.



図 12 パターン例
Fig. 12 One example of moving patterns with this system.

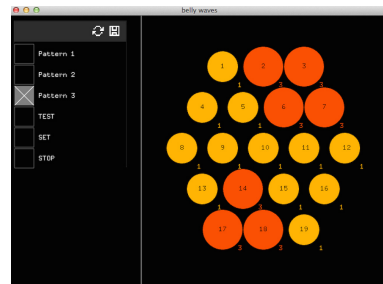


図 13 パターン操作のための GUI
Fig. 13 GUI for controlling patterns.

よる色彩の変化と、ピクセルごとの差異を情報として提示するディスプレイシステム、およびアプリケーション「BelliesWave」を開発した(図 11)。ピクセルを 19 個アレイ状に並べ、円形のサーフェスの内部に埋め込んだ。ピクセル 1 つ 1 つをコンピュータおよびマイクロコンピュータを介して制御し、サーフェスの端から端へウエーブのようにピクセルが膨張収縮するパターンや、中央から外側へ渦巻きのような順番でピクセルが膨張するパターン、特定のピクセル群が同時に膨張収縮するパターンなどの、様々な動的なパターン表示を行わせた(図 12)。また、表示するパターンを選択出来る GUI も作成した(図 13)。ゴム膜は少量の空気でも高速に膨張収縮が可能のため、色彩とその変化速度、ピクセルの動きなどに様々なリズムをつけることが可能となった。

4.2 マルチカラーディスプレイへの応用

この仕組みを応用したプロトタイプとして、白色から様々な色へピクセルが変色する、マルチカラーの実体ディスプレイを開発した(図 1)。ゴム膜の二層の色の組み合わせ

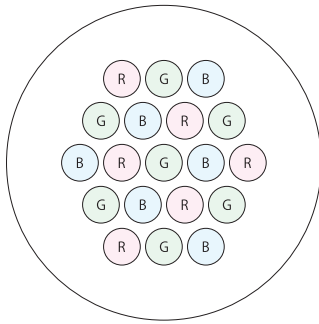


図 14 マルチカラーにおけるピクセルの配置の例

Fig. 14 Arrangement of RGB pixels in multi-color version.

せを、白色と赤色、白色と青色、白色と緑色の3種類用意し、19個のピクセルアレイの中に均等に配置した(図14)。各ピクセルは、膨張するにつれて、白色から徐々に薄い赤、青、緑へと変色し、さらに多様な色彩を表現する。赤、緑、青の3色のピクセルを1セットとすると、RGBカラーを表現する1つの画素と考えることができる。従来のディスプレイにおいて、ピクセルは「発光」して情報を変化させるのに対し、本研究では、ピクセルそのものを「発色」させることによって情報を変化させている点が、大きな特徴である。ゴム膜は非常に柔らかい物理的性質を持ち、膨張収縮により厚みを多様に変化させるため、混色の表現が可能となる。これは二層のゴム膜でのみ生み出す事のできる、特有の色彩である。

5. まとめ・展望

本研究 BelliesWave では、上記のシステムを実装することにより、ディスプレイ上で様々な情報表現を可能にした。フラットな平面から立体的な情報を動的に表現するだけでなく、その立体情報に応じ、多彩な色変化を提示することができる。我々が日常的に触れる発光ディスプレイとは異なり、素材そのものの特性を用いて発色することが大きな特徴である。従来の実体ディスプレイ研究と比較しても、実体として用いる素材の特性を積極的に利用している表現手法といえる。

風船の体積膨張には限界があり、それに伴って、色彩の変化も体積に依存してしまう点が、改善点である。今後は評価実験を進め、ピクセルの表現できる色彩と大きさの限界を測定し、より幅のある情報変化を実現するため、機構や制御方法を改善する。

ピクセルが風船のように膨張する動作は、生物の呼吸や心拍、果実の成熟などを連想させる。動的な動きが、それに対する見る人の注意を喚起し、我々に対し、「触れたい」と思わせるアフォーダンスを与えている。実際に、これまでの小規模なデモ展示において、体験者の手が自然とピクセルの上に伸びる場面が見られた。今後、このような

アフォーダンスを本研究に取り入れ、アプリケーションとして提案していきたい。例えば、人が近づくまではピクセルが膨張することなく、平面のサーフェスを保っているが、一定距離人が近づくとき、自動的に動き出すようなものが考えられる。人がテーブルに近づくとき、その距離に応じて近い側のピクセル群が徐々に膨張したり、逆に、人から離れるようにピクセル群が膨張しながら動いたりするような、インタラクティブな動きが考えられる。また、手や指によってインタラクションを行う例としては、触れることで膨らみ始める/しぼみ始める、触れている間は膨らむ/しぼむ、といった連動が考えられる。

ディスプレイとしてのスケール、ピクセルのスケールについても再検討する。ピクセルは現状では30mmほどの直径の円形だが、小型化し、より密集させて配置することによって、より高精細な画像や色彩がRGBユニットによって表現することが可能になると考えられる。あるいは、現時点のピクセルのサイズのまま、個数を増大し、数メートル四方の大きなサーフェスを作成すれば、よりダイナミックな表現に優れたディスプレイが実現出来ると考えられる。

参考文献

- [1] Daniel Rozin: "Wooden Mirror", ACM SIGGRAPH 2000, Art Gallery (2000.7).
- [2] Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, Akimitsu Hogge, Hiroshi Ishii: "inFORM: dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation", ACM UIST 2013, Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology, 417-426 (2013.10).
- [3] Shiho Hirayama, Yasuaki Kakehi: "Shaboned Display: an interactive substantial display using soap bubbles", ACM SIGGRAPH 2010, Emerging Technologies Article No.21 (2010.7).
- [4] Tomoko Hashida, Yasuaki Kakehi, and Takeshi Naemura: "Photochromic Sculpture: Volumetric Color-forming Pixels", ACM SIGGRAPH 2011, Emerging Technologies (2011.8).
- [5] 阿部幸司, 矢野博明, 岩田洋夫: "空気圧バルーンを用いた体積型ハプティックディスプレイ", ヒューマンインタフェース学会研究会報告集 Vol4(3), 67-70 (2002.6).
- [6] Andrew Stevenson, Christopher Perez, Roel Vertegaal: "An inflatable hemispherical multi-touch display", TEI'11, Proceedings of the fifth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction, 289-292 (2011.1).
- [7] Nils Voelker: <http://www.nilsvoelker.com/>, (2014年7月現在)
- [8] 櫻井翔, 鳴海拓志, 勝村富貴, 谷川智洋, 廣瀬通孝: "Interactonia Balloon: 風船を用いた能動的呼吸の誘発による緊張感の喚起・増幅", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 18(3), 361-370 (2013.9).
- [9] 中島康祐, 伊藤雄一, 林勇介, 池田和章, 藤田和之, 尾上孝雄: "EmoBalloon: ソーシャルタッチインタラクションのための柔らかな風船型インタフェース", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 18(3), 255-265 (2013.9).
- [10] マルサ育藤ゴム ヘンシンバルーン: <http://www.marusa.co.jp/>, (2014年7月現在)