

# 静電気をを用いた 実体型三次元ディスプレイに関する研究

柏木剛, 谷川智洋, 廣瀬通孝  
東京大学

三次元ディスプレイの開発が盛んになってきたが、現時点ではディスプレイによって表示される物体と実物体とは別物として認識されている。これは物体が実際にそこにあるという感覚を人に与える性質、つまり実体性が欠けているためである。そこで本研究では、物体の集合を利用して実体性を持たせた三次元形状を提示できるディスプレイを提案・検証する。三次元形状を提示する方式として、静電気をを用いて三次元的に並べたフィルムに発泡スチロール粒を付着させる方式と、発射したシャボン玉を静電気によって直進させ発射するタイミングを制御する方式を提案し、それぞれのプロトタイプを作製・評価した。

## Material-based 3D Display by Static Electricity

Go Kashiwagi, Tomohiro Tanikawa, Michitaka Hirose  
The University of Tokyo

Despite rapid progress in 3D displays technology, we can still feel that objects showed in conventional displays are different from objects in real world because they are not physical material. In this paper, we propose a novel display system that uses physical particles, such as styrofoam particles and soap bubbles, to display materialized objects. In order to construct 3D shapes, we use static electricity to position styrofoam particles onto three-dimensionally placed films, and to control the flow of soap bubbles. Performance of each prototype will also be evaluated.

### 1. はじめに

没入型多面ディスプレイ CAVE[1], CABIN[2][3] や、HMD, 裸眼立体視液晶[4], 体積走査型ディスプレイ[5-7]など、物体を立体的に映し出す三次元ディスプレイの開発が盛んになされている。これらのディスプレイでは、表示される物体と実物体とは別物として認識されている。これは物体が実際にそこにあるという感覚を人に与える性質、つまり実体性が欠けているためである。

例えばテーブルの上に三次元ディスプレイが配置されどれほど解像度の高いりんごの画像を表現しているとしても、誰もそこにりんごが置いてあると勘違いすることはない。現在研究されているディスプレイには棒が存在していること、シャッターメカのような特殊な環境下でのみ使用可能なことなどがこの現象の原因として挙げることができる。また、従来のディスプレイは自発光型や人工光反射型であり、自然光をはじめ外界からの影響を受けることが非常に少ないこともその原因である。

バーチャルリアリティの目指しているところは実世界の物体を実際そこに存在するかのように表現することであるが、現在の三次元ディスプレイではそれは実現されていない。そのため、別方向からのアプローチの手法の一つとして、光ではなく物体の集合を利用することで、目的の物体を表現するという方法が挙げられる。

物体の集合を利用することで実体性を実現した

ディスプレイとしてピンロッド型ディスプレイ[8-10]や磁性流体彫刻[11]などが報告されている。しかし、ピンロッド型は一面のみの表現、磁性彫刻流体は一定の形のみの表現に留まっている。

そこで本研究では、物体の集合を利用して実体性を持たせた三次元形状を提示できるディスプレイを提案・検証する。三次元形状を表現するためには、「任意に形状を表現する」とことと「空間中に表示物体を存在させる」ことが必要である。具体的には、粒子として、発泡スチロール粒、シャボン玉を用い、静電気を駆動力として制御する三次元ディスプレイである。

### 2. 静電気をを用いた実体型三次元ディスプレイの提案

物体の集合を用いて目的の物体を表現する方法として、粒子と流動体を利用する方法がある(図1)。流動体を用いて目的の物体を表現しようとしたときに、強く重力を受けるなどの理由から、任意の形状を表現するような制御を行うことが非常に困難である。そこで、制御の容易さから粒子を採用した。

物体の集合を制御する駆動方式として静電気力、磁力、重力などが挙げられる。重力は鉛直方向に一定量の力しか与えられない。また、静電気力は帯電している物体ならばどんな物体でも力を与えることが可能であるのに対し、磁力が力を与えることの

できる粒子は鉄粉など比重が大きく重力の影響を大きく受ける粒子のみである。以上の理由により駆動力として静電気力を採用した。

さらに駆動力として静電気を利用した場合、物体を三次元状に表現する方法として、粒子を何かに付着させる付着方式と、粒子を空中に漂わせる発射方式が考えられる。また使用する粒子は軽いこと、静電気を帯電可能であることが必要とされる。そこで、付着方式の粒子として軽くて静電気を日常的に帯電している発泡スチロール粒を、発射方式の粒子として軽くて静電気を簡単に帯電させることができるシャボン玉を選定した。発泡スチロール粒を用いて任意に形状を表現することを目指し、シャボン玉を用いて空間中表示物体を存在させることを目指す。

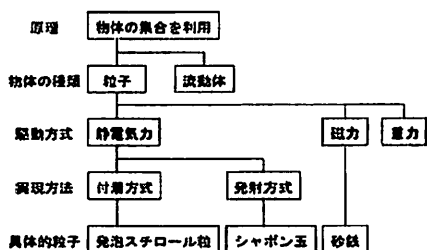


図1 実体型三次元ディスプレイの実現方法  
Figure 1 Methodology of material-based 3D display

### 3. 発泡スチロール粒を用いた実体型三次元ディスプレイ

#### 3.1 実現方法とシステム構成

発泡スチロール粒を用いた実体型三次元ディスプレイ実現手法は、三次元空間に置かれた複数の導電フィルムに、発泡スチロールが接着するかどうかが三次元物体を形成するものである。

システムとしては、まず上から発泡スチロール粒を降らせ、導電物質でできたフィルムに静電気を発生させ発泡スチロールを付着させる。このフィルムを何枚も並べ電荷を貯める部分を変化させることで、立体的な画像を物理的に構築する。また、発泡スチロール粒が付着しているピクセルに逆電荷の静電気を送り込むことで発泡スチロール粒とフィルムを反発させ、発泡スチロール粒の着脱を行う。

具体的には、導電物質をピクセルごとに電気的に分離し、どのピクセルに静電気を発生させるかをPICとソレノイドを用いたスイッチング機構を利用することで制御する(図2)。静電気発生装置は常に静電気を発生しており、スイッチがONになると電気的にスイッチの先のピクセルと静電気発生装置が繋がり、そのピクセルに静電気が帯電することで発泡スチロール粒が付着する。

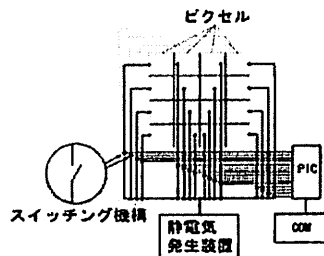


図2 システム構成  
Figure 2 System configuration

#### 3.2 基礎実験

三次元ディスプレイを設計する段階での基礎実験として、発泡スチロールの導電体フィルムにおける着脱実験、および、導電体フィルム同士の配置実験について行った。

まず逆電荷による発泡スチロール除去能力が十分であることを確認するために、ソレノイドを使用して試作したスイッチング機構を用いて1ピクセルに対する発泡スチロール粒の着脱精度実験(以下、着脱実験)を行った(図3)。



図3 着脱実験の様子  
Figure 3 Fixing and dropping of particles on each pixel

一度ピクセルを十分に充電し発泡スチロール粒を付着させ、そのピクセルに逆電荷を送り込むことで発泡スチロール粒を除去し、除去できずに残った発泡スチロール粒の数を測定した。平均個数が31.2個であったが、これは十分に帯電したピクセルの片側に付着する発泡スチロール粒が約800個であることを考えると約4%足らずであり、十分に除去することができたと考えられる。より完璧に除去するには、パイプレーターなどによって帯電したピクセルには影響を与えないほど微弱な振動を与えることが考えられるが、今回は完全に除去することを目的としているわけではないので、十分に除去できたと考え、提案するシステムに適用可能であると判断した。

次に、プロトタイプを設計するための実験として以下の2つの実験を行った。

まずピクセルにつながる導線の接する距離と静電気の漏洩量の関係を調べ、プロトタイプ作成時の問題発生の可能性を確認することを目的と

した実験（以下、静電気漏洩実験）を行った。静電気発生装置に繋いだピクセルと繋いでいないピクセルを用意し、それぞれのピクセルに繋がった導線を接触させることで後者のピクセルにも漏洩することで静電気が帯電する。導線同士の接触距離を変化させ後者のピクセルに付着した発泡スチロール粒の数を測定した。この実験の様子と結果を図4、図5に示す。

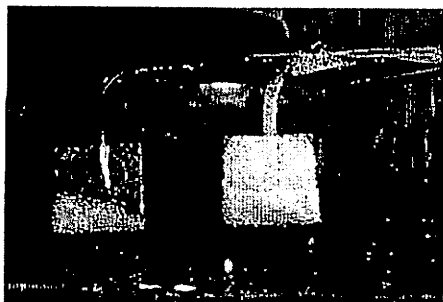


図4 静電気漏洩実験の様子  
Figure 4 Image of static electricity leakage experiment

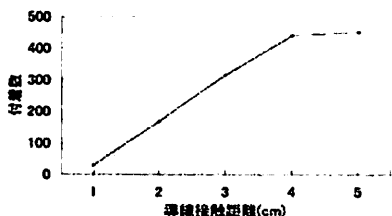


図5 静電気漏洩実験結果  
Figure 5 Result of static electricity leakage experiment

まず導線同士の接触距離が増加するにつれて静電気が漏洩する量も増加するという関係を確認した。つまりプロトタイプを作製する上でピクセルにつながっている導線同士が接触する距離をできる限り短くすることが重要になると言える。また、全体的に接触距離と静電気漏洩量はほぼ比例関係にあるが、接触距離 1cm ではほとんど付着していない状態にまで数が減少しているため、1cm 程度までの接触距離ならば静電気漏洩量を最小限に抑えることができることがわかった。この実験結果をふまえて、導線同士の接触距離を少なくする方向でプロトタイプの作製を考案した。

次に向かい合ったピクセルによって起こる静電誘導の量とピクセル間の距離の関係を調べ、それによってプロトタイプのスペックを決定することを目的とする実験（以下、静電誘導実験）を行った。静電気発生装置に繋いだピクセルと繋いでいないピクセルを用意し、2つのピクセルを向かい合わせに配置すると、静電誘導によって後者のピクセルに

も静電気が帯電する。ピクセル間の距離を変化させ後者のピクセルに付着した発泡スチロール粒の数を測定した。この実験の様子と結果を図6と図7に示す。

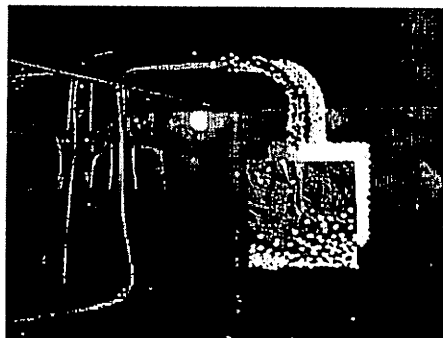


図6 静電誘導実験の様子  
Figure 6 Image of electrostatic induction experiment

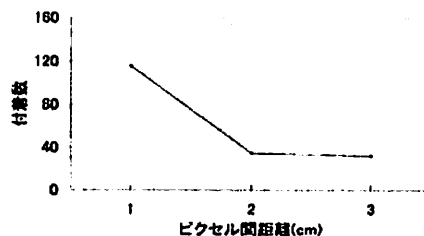


図7 静電誘導実験結果  
Figure 7 Result of electrostatic induction experiment

この実験結果より、2cmと3cmでほぼ計測結果が変わらず、1cmになると急増することから、2cm以上ピクセル間の距離を取って配置すれば静電誘導の影響は考えなくて良いと確認した。

### 3.3 プロトタイプの作製と表示実験

以上の実験結果を基にプロトタイプを設計・作製した。プロトタイプは2cm×2cmのピクセルを隣同士1cm間隔、向かい合ったピクセル間距離3cmで3×3×4個並べた（図8）。

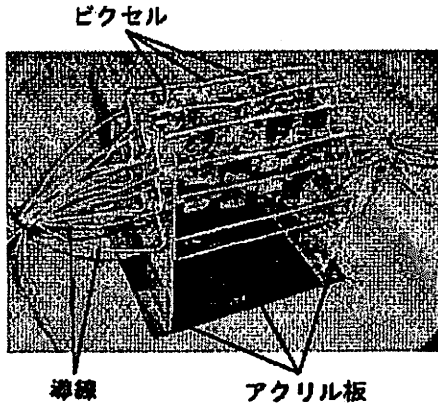


図8 プロトタイプのご概観  
Figure 8 Prototype of styrofoam display

作製したプロトタイプの三次元物体の表示能力を評価し、発泡スチロール粒を用いた実体型三次元ディスプレイの有用性を評価するために、このプロトタイプを用いて表示実験を行った。発泡スチロール粒を除去する予定のピクセルのみスイッチング機構を通して静電気発生装置につなぎ、そのほかについては手で表示したいピクセルと静電気発生装置を接続した。まず奥行きのある画像を表示可能であることを確認するために、奥行きのある平面を表示する実験を行った。次に、意味のある形状を表示可能であることを確認するために「H」を表示させる実験を行った。さらに、動画表示の実現可能性を確認するために発泡スチロール粒を着脱し「H」から「h」へと表示を切り替える表示実験を行った。それぞれの実験結果を図9、図10、図11に示す。

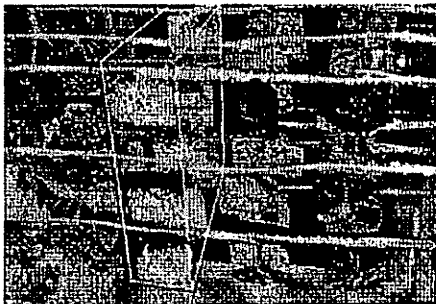


図9 平面の表示実験  
Figure 9 Expression of 3D surface

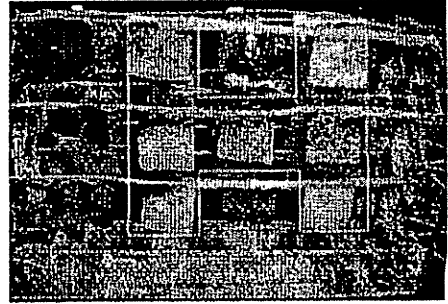


図10 [H]の表示実験  
Figure 10 Expression of letter "H"

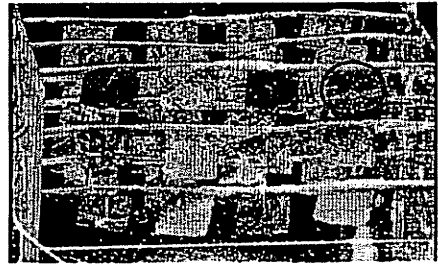


図11 [h]の表示実験  
Figure 11 Expression of letter "h"

図9より、黄色の枠で囲まれた部分のみ選択的に表示できていることがわかる。これより、プロトタイプによって奥行きのある物体を表示可能であることを確認することができた。また、図10より、「H」の文字を十分に認識することができる程度の発泡スチロール粒が付着していることがわかる。これより、意味を持った形状を提示することが実現可能であることを確認した。さらに図11より、「H」の文字の右上のピクセルのみ発泡スチロール粒が取り除かれ、「h」の文字を認識可能であることがわかる。これによって、任意のピクセルにおいてスイッチング機構により逆電荷を送ることでピクセルのON、OFFを制御し動画表示が可能であることを確認した。これらの結果より、この章において提示した方法によって三次元物体を表示することが原理的に可能であることを示すことが出来た。

### 3.4 今後の課題と展望

フィルムにアルミ箔でなく透明導電性フィルムをピクセルとして使用することで透過性を高め、ピクセルの数を細かくし数を増やしたディスプレイを製作することで、奥行きを持った意味のある形状を自由に表示することが可能であると考えられる。

またプロトタイプの作製と実験によっていくつかの問題点が生じた(図12)。まず隣のピクセルからの静電気の漏洩により、意図していないピクセルにも発泡スチロール粒が付着する問題が発生した。

この問題はピクセルにつながっている導線同士の接触距離を少なくする設計を行った上で発生した問題であるため、完璧に静電気の漏洩を防ぐには導線同士が全く接触しない構造を考案する必要がある。次に、導線に帯電することで発泡スチロール粒が付着し表示物体が見えにくくなってしまふ恐れがあるため、より細い導線を用いた実験を行うなどピクセル以外の部位に発泡スチロール粒が付着しないようにするための工夫をすることが必要である。さらに、今回は簡単のためアルミ箔をフィルムとして使用しているが、アルミ箔の使用によって起こるピクセル数を多くしたときの内部の不可視性を改善するために透明導電性フィルムを用いることを考えている。

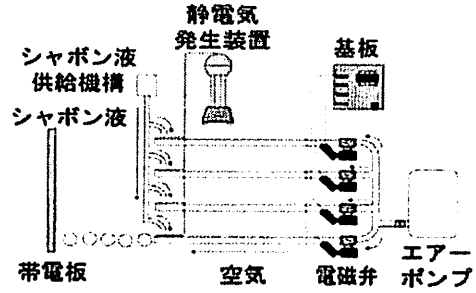


図 13 システム構成  
Figure 13 System configuration

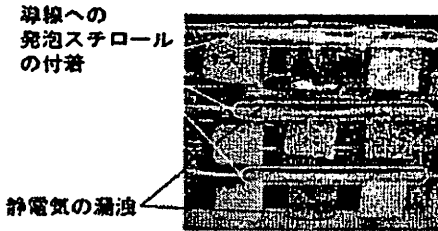


図 12 意図していない部分への付着  
Figure 12 Fixing error to unexpected part

将来的には入力棒などを使った外部からの何らかの入力により、各ピクセルに電荷を付加または排除することで任意に表示画像を変形できるインタラクティブな機構を付け加えて三次元設計に応用することを検討している。

## 4. シャボン玉を用いた実体型三次元ディスプレイ

### 4.1 実現方法とシステム構成

シャボン玉を用いた実体型三次元ディスプレイの実現方法としては、静電気を帯電させたシャボン玉を、逆電荷で帯電させた板などを利用して制御し、三次元物体を形成するものである。

まずシャボン玉を帯電させると逆電荷を帯電させた板に引き付けられることを利用する。噴出口をたくさん配置し、空気の流れを電磁弁によって制御する。任意の噴出口からシャボン玉を発射する。また、噴出口の先に導線を接着することでシャボン玉を帯電させる。そして逆電荷を帯電させた帯電板に引き付けシャボン玉を目的の軌道に乗せることで立体画像を作り出す(図 13)。

### 4.2 基礎実験

シャボン液供給機構や帯電板などを作製し、その上で噴出孔のプロトタイプを作製するために以下のような実験を行った。

まず発生したシャボン玉はすべて同じ電荷に帯電しているため、平行に発生させるとシャボン玉同士が反発して軌道が曲がるという現象が予想される。また、シャボン玉の大きさによって反発の影響の大きさに違いが現れると予想される。そこで、噴出孔間の距離、シャボン玉の大きさとシャボン玉の軌道のずれの関係を調べ、プロトタイプのスペックを決定するために以下のような実験(以降、シャボン玉反発実験)を行った。

噴出孔を2つ平行に配置し、静電気を帯電させてシャボン玉を 0.5sec 間隔で発射し軌道のずれを計測、平均値を算出した。また噴出孔の大きさ、噴出孔の間隔の値を変化させた。この実験の様子と実験結果を図 14、図 15 に示す。

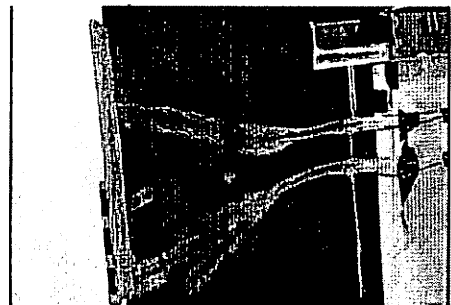


図 14 シャボン玉反発実験の様子  
Figure 14 Image of soap bubbles repulsion experiment

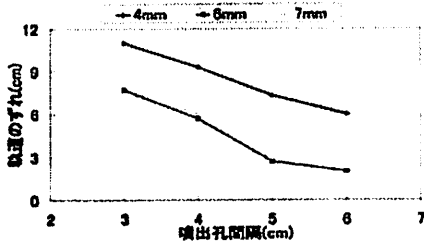


図 15 シャボン玉反発実験の結果  
Figure 15 Result of soap bubbles repulsion experiment

この実験結果より、まず噴出孔が近いほどシャボン玉の軌道のずれは大きくなることを確認した。また、噴出孔間の距離が 5cm と 6cm では軌道のずれに変化が少ないこと、噴出孔間の距離を短くすることによりプロトタイプの表示能力が向上すること等の理由によって噴出孔間の距離を 5cm に決定した。

次に、噴出孔の直径が 4mm のときに反発の影響が大きく現れ、6mm と 7mm ではほとんど実験結果に変化が見られなかった。また直径 7mm の場合、垂水方式によるシャボン液供給機構ではシャボン膜ができないためにシャボン玉が発生しないケースが多く見受けられた。これらの理由から噴出孔の直径は 6mm にすることを決定した。

次に噴出孔と帯電板の距離や噴出時間とシャボン玉の到達確率の関係を調べ、噴出孔と帯電板の距離を決定し適当な噴出時間を調べるために以下のような実験を行った（以降、シャボン玉到達率計測実験）。

噴出孔と帯電板の距離や噴出時間を変化させ、噴出したシャボン玉の総数と帯電板まで直進したシャボン玉の数を計測・平均化し、到達率を求めた。（ここではズレが 5cm 平方以内に収まっていれば直進したとみなした。）この実験の様子と実験結果を図 16、図 17 に示す。

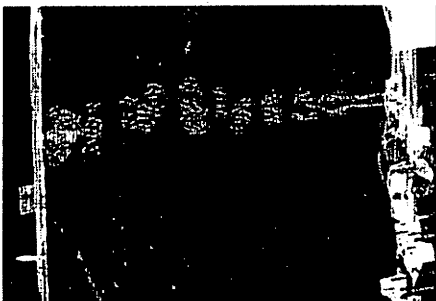


図 16 シャボン玉到達率計測実験の様子  
Figure 16 Image of arrival probability experiment

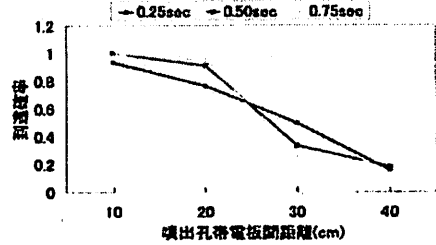


図 17 シャボン玉到達率計測実験の結果  
Figure 17 Result of arrival probability experiment

まず当然の結果であるが噴出孔と帯電板間の距離が短いほど、シャボン玉が直進して帯電板に到達する確率が上がることを確認した。

またシャボン玉の到達率は、噴出孔と帯電板間の距離が 10cm と 20cm でほとんど変化せず 30cm になると大幅に下がるという傾向が見られたため、20cm が適当であると考え、表示実験は噴出孔帯電板間の距離を 20cm 取って行うこととした。

実験中に噴出開始直後のシャボン玉 7, 8 個は噴出孔に溜まっていたシャボン液がシャボン玉発生と同時に噴出し、シャボン玉と一体化し重力によって下方に曲がるまたは落下していく現象を確認した。このため、図 16 のグラフは噴出直後のシャボン玉 8 個を計測対象から外している。それでも基本的に噴出時間が長いと到達確率が上がっていることから、シャボン玉の軌道が安定するまでに少々時間がかかることがわかる。シャボン液が噴出孔に溜まっていることがこれらの現象の原因であるため、シャボン液を垂れ流しにせず噴出時だけ供給する機構を作製することでこの問題は解決することが可能であると予想される。

#### 4.3 プロトタイプの作製と表示実験

以上の実験結果を基に 4×4 のシャボン玉発生機構のプロトタイプを作製した。噴出孔の内径を 6mm、噴出孔間距離を 5mm、噴出孔と帯電板間の距離を 20cm として配置した。その概観を図 18 に示す。

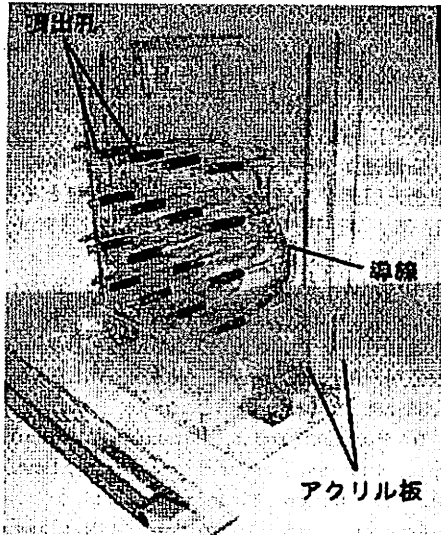


図 18 プロトタイプの様相  
Figure 18 Prototype of soap bubbles display

このプロトタイプの性能評価を行うために以下のような表示実験を行った。

まず複数の噴出孔から自由にシャボン玉を噴出させることが可能であることを確認するために 6つの噴出孔から順番にシャボン玉を噴出させ、また 2つずつ同時に噴出させた。次に、単純な形状を表示可能であることを確認するために三角形を表示する実験を行った。またシャボン玉の軌道制御の実現可能性を示すために帯電板を手で動かす実験を行った。この実験の様子を図 19、図 20 に示す。

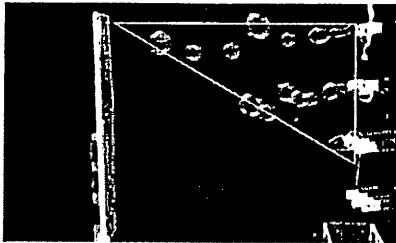


図 19 三角形の表示  
Figure 19 Expression of triangular shape

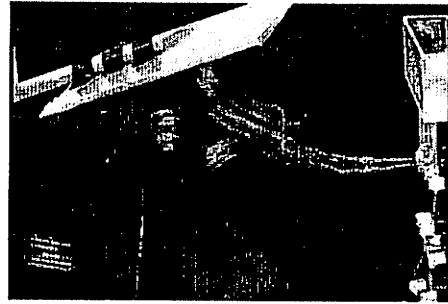


図 20 軌道の曲がる様子  
Figure 20 Controlled bubbles stream by electrically-charged board

まず任意の噴出孔からシャボン玉を噴出可能であることを確認した。また、図 18 より三角形を十分に認識することができる程度の形を保ってシャボン玉が浮遊していることを確認できた。これより、意味を持った形状を提示することが実現可能であることを示した。また、図 19 よりシャボン玉の軌道を意図した方向に曲げることが十分にできていることがわかる。これより、シャボン玉の軌道制御の実現可能性を示すことができた。これらの結果より、この章において提示した方法によって三次元物体を表示することが原理的に可能であることを示すことが出来た。

#### 4.4 今後の課題と展望

この章で提案したシステムは横スクロール型の表示方法でスクロールの速度が秒速約 1.5m である。今回作成したプロトタイプではスクロール速度が非常に速く感じてしまうために、噴出孔と帯電板の距離を離し噴出孔の数を増やすことでシステムを巨大化することが必要である。静電場をうまく制御し直線的な電場を作成することが実現すれば、より噴出孔と帯電板の距離を離すことが可能となるため、システムの巨大化の実現可能性は高い。また、システムの巨大化を実現することが出来れば、より自由に物体を表現することが可能となる。また、ストロボなどを用いることでスクロール速度の問題を解決することも考えている。

また、噴出孔にシャボン液が溜まることで噴出直後のシャボン玉が下方に曲がるあるいは落下するという現象によって、短い時間シャボン玉を噴出することが必要な形状を表現する際に形が崩れてしまう、また成功率が低いなどの問題が発生した。空気の流量制御を行い、シャボン玉の供給のタイミング、噴出孔の形状、供給機構の構造などについて検討し直し改善する必要がある。それによって噴出時間を短くすることを実現することで、画像をより自由に表現することが可能となる。

また、画像を表示している時に手を入れることで

シャボン玉に触れることが可能であり、帯電板を手で移動させることでシャボン玉の軌道を変化させることを実現できたため外界とのインタラクティブ性を高く評価することができるディスプレイとして発展が期待される。

また、「zubbles」[12]などのカラーシャボン玉を利用することで任意の色をつけた画像を表現することが可能であり、横スクロール型のディスプレイでかつインタラクティブ性を持った実体型電光掲示板等として利用できるのではないかと考えている。

## 5. まとめ

本研究では、実体型三次元ディスプレイとして、光で表現する手法ではなく物体の集合によって画像を表現する手法を提案した。駆動方式として静電気を選定し、自由に画像を表現できる、空間中に画像を浮遊させることが出来る、という観点から発泡スチロール粒とシャボン玉を粒子として選定した。さらに、その2つの粒子を用いてそれぞれ実際にディスプレイのプロトタイプを製作し、本研究における表現手法の有用性を検証することにより、三次元ディスプレイによる実体性を持った画像の表現や外界とのインタラクションの実現への一つの新たなプロセスを示すことが出来た。

本研究では実体型三次元ディスプレイについて、自由に画像を表現できる、空間中に画像を浮遊させることが出来る、という観点から2つの手法を提案しその有用性を示した。しかしその2つの性質を併せ持ったディスプレイを開発することが本来は理想であるため、今後はそのような表現手法を実現することが課題である。

例えばシャボン玉を粒子として用い、静電気力を制御し空中にとどめることを実現出来れば、横スクロール型でなく自由に画像を表現することが可能になると考えられる。

そのような三次元ディスプレイを実現しよりディスプレイを巨大化して解像度を高めることが出来れば、実体性を持った画像を自由に表現することが現実的なものとなるであろう。

## 参考文献

[1] C. Cruz-Neira, D. J. Sandin, and T. A. DeFanti: Surrounding-screen projection-based virtual reality: The design and implementation of the cave. In Computer Graphics, Proc. of SIGGRAPH

'93, pp. 135-142, 1993.

[2] M. Hirose: A multiscreen display for computer experiments. In Proc. of 2nd International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM'97), pp. 78-83, 1997.

[3] 廣瀬通孝, 小木哲朗, 石綿昌平, 山田俊郎: 多面型全天周ディスプレイ (CABIN) の開発とその特性評価, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J81-D-II, No. 5, pp. 888-896, 1998.

[4] TOSHIBA: [http://www.toshiba.co.jp/about/press/2005\\_04/pr\\_j1501.htm](http://www.toshiba.co.jp/about/press/2005_04/pr_j1501.htm).

[5] 亀山研一, 大富浩一: 3次元ディスプレイとその応用, Human Interface N & R, Vol. 7, No. 2, pp. 233-238, 1992.

[6] D. Miyazaki and K. Matsushita: Volumetric display that uses an inclined image plane. In Appl. Opt. 40, pp. 3354-3358, 2002.

[7] Favalora, G.E.: Volumetric 3D Displays and Application Infrastructure. In IEEE Computer, Volume 38, Issue 8, pp. 37-44, 2005.

[8] 仲谷, 内田, 山暴, 梶暴, 川上, 舘: 形状記憶合金を用いた3次元形状ディスプレイの提案, 第8回バーチャルリアリティ学会, pp. 247-248, 2003.

[9] Nakatani, Kajimoto, Sekiguchi, Kawakami and Tachi: 3D Form Display with Shape Memory Alloy. in Proc. of 13th International Conference on Artificial reality and Telexistence (ICAT), pp. 179-184, 2003.

[10] 中茂, 広田, 廣瀬: 高密度点刺激型触覚ディスプレイ: 日本バーチャルリアリティ学会 第9回大会論文集, pp. 275-282, 2004.

[11] 児玉幸子: 磁性流体彫刻, 日本バーチャルリアリティ学会第10回大会論文集, pp. 518-519, 2005.

[12] Zubbles: <http://www.zubbles.com/>.