

# TuVe: チューブを用いたディスプレイ

井上佑貴<sup>1</sup> 伊藤雄一<sup>1</sup> 尾上孝雄<sup>1</sup>

**概要:** タブレットやスマートフォンのような、入力面と出力面が一致したインタフェースであるインタラクティブサーフェスは、指などを用いた直感的な情報の操作を可能とする反面、その表面形状は平面である場合が多く、二次元に沿った形でしか情報を提示できない。そこで本研究では、様々な表面形状に適用可能なディスプレイとして、チューブを表示媒体として用いたディスプレイ、TuVe を提案する。TuVe は、チューブによってディスプレイを構成し、チューブ内の流体によって情報を提示するシステムである。表示筐体にチューブを用いることで様々な形状に適用可能なフレキシブルなディスプレイが実現可能である。本稿では、チューブディスプレイ TuVe の実現に必要な要素に関して議論し、システムの構成と制御手法を検討した。またその機能を評価するために、提案システムによってピクセルの長さや位置を制御する実験を行った。結果として、指定した位置へ指定した長さのピクセルをほぼ誤差なく移動させることができ、提案システムによってディスプレイを実現できる。

情報技術の発展に伴い、マルチタッチディスプレイのようなインタラクティブサーフェスが身近なものとなりつつある。インタラクティブサーフェスは入力面と出力面が一致したインタフェースで、指などを用いた直感的な情報の操作を可能とする。タブレットやスマートフォンなど、インタラクティブサーフェスを用いたデバイスは日常に浸透しつつあり、インタラクティブサーフェスに関する研究も様々になされている。しかし、これらのデバイスの表面はガラス平面のようなソリッドなものが多い。このようなサーフェス面では二次元に沿った形でしか情報を提示できず、表現の幅に制限がある。これに対し、立体的な表面形状の物体を用いて情報を提示するシステムが様々に提案されている。これらは平面ディスプレイでは直感的に与えられない凹凸などの情報を提示できるため、2次元平面に限定されないさらに高度な情報提示を可能とする。このように様々な表面形状をとる物体をディスプレイとして利用することで、ディスプレイの形を選ばない新しい情報提示を可能とする。そこで本研究では、様々な表面形状に適用可能なフレキシブルなディスプレイとして、チューブディスプレイ TuVe を提案する。

## 1. はじめに

TuVe は、図 1 に示すように物体にチューブを巻き付けるなどの手法でディスプレイを構成し、チューブ内に着色



図 1 TuVe の概要 (左: ディスプレイ部にて文字 'イ' を表示したもの 右: システムの全体図)

液などの流体を流すことで情報を提示するディスプレイである。表示筐体にチューブを用いることで、チューブを物体に巻き付けるだけで容易にディスプレイを構成できるようになる。さらに、その形状の柔軟性から、通常の 2次元ディスプレイでは表現が難しいような様々な形状を用いた表示が可能となる。また、表示媒体としてチューブ内の着色液を用いることで、ディスプレイ部分を構成するものがチューブのみとなるため、メンテナンスや交換、またサイズや形状などの変更が容易となる。さらに、流す流体の種類・性質を変えることで、システム自体を変えることなく様々な種類の情報を直感的に提示するディスプレイの構成を可能とする。

本稿では、チューブディスプレイ TuVe の実現に必要な要素に関して議論し、システムの実装とその制御手法を検討する。さらに、その機能を評価するために行った実験について述べる。

<sup>1</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

## 2. 関連研究

### 2.1 様々な表面形状の物体による情報提示

様々な表面形状の物体によって情報を提示する手法として、アクチュエータアレイによって表面形状を変化させるシステムの研究が様々になされている。Follmer らは上下に駆動するリニアアクチュエータアレイを使用して立体情報を提示する“inFORM”を提案している [1]。アクチュエータアレイによって立体形状を表現し、上部のプロジェクタから映像を投影することで情報を提示する。また Schoessler らは、リニアアクチュエータアレイ上で様々な実物体を操作する手法を“Kinetic Blocks”として提案している [2]。アクチュエータの上下動によってブロックの移動、回転などの操作や、積み上げ、放出などを可能とする。また内部に歯車を搭載して、アクチュエータの上下動を水平方向や回転方向の動きへと変換することを可能とするブロックの実装もなされている。これにより、垂直方向の形状変化しか表現できないという、リニアアクチュエータアレイを用いたディスプレイが持つ制限の克服を試みている。しかし、アクチュエータアレイを用いたシステムは制御のために膨大な信号線を要し、システムの拡大や変更・メンテナンスも容易ではない。様々な形状の表面に情報を表示するもう一つの手法として、物体に映像を投影するプロジェクションマッピングがある。Asayama らは、物体に印刷したマーカにより物体の位置や角度を認識してリアルタイムに映像を投影するシステムを提案している [3]。マーカを 3D プリンタによって印刷し、映像を投影するときはプロジェクションの放射量を補正することによりマーカを視認できないようにする。また物体表面の凹凸に対してロバストなマーカの選定や、表面形状からマーカの配置を自動的に決定するアルゴリズムの実装により、様々な表面形状に適用できるようにしている。しかしプロジェクションマッピングには、プロジェクタを用いることに起因する制約が存在する。例として暗所を要することや、オクルージョンの無い環境を要することなどの環境条件が挙げられる。本研究で提案するシステムはディスプレイ部をチューブのみで構成することから構成が容易でスケラブルである。また情報の提示にプロジェクタなどの投影機を必要としないため、プロジェクタの利用に起因する制約も回避できる。

### 2.2 流体を用いたディスプレイ

流体には流動性があり、環境に合わせて様々な形を取ることができる。よって、流体を情報提示に用いることで、より自由度の高い形状での情報提示が可能になると考えられる。Kojima らは、水滴の形などを制御して情報を提示するディスプレイ“PolkaDot”を提案している [4]。この

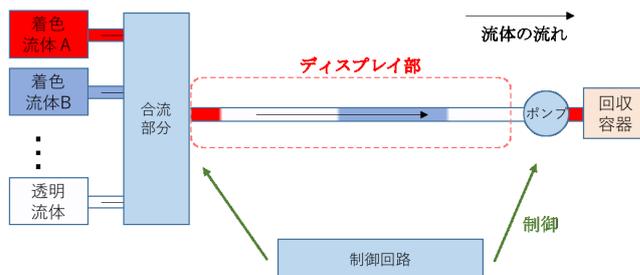


図2 システム構成

システムでは、超撥水布の凹凸をアクチュエータにより制御することで布上の水滴の位置、形状を制御する。また水滴を用いることで、拭き取ることなどの直感的なインタラクションを可能とする。Nakagaki らは、膜状の流水の形状を制御して情報提示に利用する“Hydro Morph”を提案している [5]。このシステムでは流水が平面に当たることで形成される膜状の水を、上下するアクチュエータによりせきとめることで形状を変化させる。しかし、流体の形状を制御する研究はあまり進んでいるとはいえ、制御できる形状は平面上の水滴などのように制限があるものがほとんどである。我々の提案システムでは、チューブを用いて流体の形状を制御することで様々な表面形状の表現を可能とする。チューブを用いて三次元形状を表現することを試みたアート作品として“Tokyo Arteria”が公開されている [6]。しかし、フレキシブルなチューブを用いてチューブ内液体の位置を制御することで情報を提示する研究は進んでいない。

## 3. チューブディスプレイ TuVe

### 3.1 システムの概要

図2に示すように、我々が提案するチューブディスプレイ TuVe は、ディスプレイ部となるチューブ、流体、ポンプ、合流部分、およびその制御回路と流体の回収容器からなる。チューブに合流部分とポンプを接続し、ポンプにより流体を合流部分へと送り出す。流体は透明部分と着色部分にあたる複数種類のものが存在し、合流部分へと送り込まれた流体はそれぞれが分離した状態のままディスプレイ部に交互に流入する。制御回路によりポンプや合流部分を制御し、ディスプレイ部内の流体位置を任意に制御することで情報を提示する。

### 3.2 システム構成の検討

#### 3.2.1 システム構成要素の検討

##### 使用する流体

まず、システムに使用する流体に関して検討する。提案システムでは透明流体と着色流体を分離した状態でディスプレイ部に流し込む。それぞれの流体は分離した状態のままディスプレイ部内を移動する。よって、互いに混ざり合

わないような組み合わせの流体を用いる必要がある。着色流体としては簡単に手に入り着色がしやすい流体として水を用いる。透明流体として、水と混ざり合わない物質として油、空気を検討する。流体の組み合わせを検討するための予備実験を行った。透明流体で満たしたチューブ内に 20 mm の着色層を作り 500mm 移動させ、移動時の層の様子を目視で確認する。油は入手が容易で扱いやすく、粘度が比較的小さい油としてマッサージオイル (Larne) を用いた。結果として、水と油の組み合わせにおいて、移動中に水の層に油が進入する現象が見られた。これは、チューブが疎水性であるために油が水よりもチューブ壁面に付着しやすいことが原因と考えられる。水と空気の組み合わせにおいてはこのような進入は見られなかった。よって本研究では、混ざりあわない物質の組み合わせとして、水と空気を用いる。着色部分として絵具で色をつけた着色水、透明部分として空気を用いる。水は不透明水彩絵具 (ターナー) により着色した。

#### ポンプ

ポンプは制御が容易で小さい単位での流量制御を可能とする小型ローラーポンプとして、PT-HP1-11-KA (ツカサ電工, 吐出流量 11 ml/min<sup>\*1</sup>) を用いる。ポンプのコントロールには駆動時間を用いる。回収容器は流路の先端が大気開放となるように設置する。各素子の制御にはマイコンを用いる。本研究では Arduino UNO を用いた。

#### チューブ

次にシステムに使用するチューブに関して特に材質と径を検討する。提案システムではチューブ内の流体によって情報を提示するので、チューブは透明で内部を視認できる材質である必要がある。そのような透明性を満たす素材としてシリコンゴムとペルフルオロアルコキシフッ素樹脂 (PerFluoroalkoxy Alkanes, PFA) によるチューブが存在する。シリコンゴムを用いる利点は、その柔軟性である。シリコンゴムは、ねじる、引き伸ばすといった様々な変形ができ、また座屈しても容易に元に戻る。よって、弾性のない素材によるチューブと比較して、より幅広い形状を表現することが可能である。一方で PFA を用いる利点は、その高い非粘着性である。物質が付着しづらい性質をもつため液だまりしづらく、より正確にチューブ内流体の制御が可能である。チューブの径に関しては、内径を小さくすることで界面張力がより支配的になることが知られている [7]。また、より径の小さいチューブは最小曲げ半径もより小さく、より細かな形状を表現出来る。しかし小さい内径のチューブでは位置制御のためにより細かい単位での流量制御を必要とする。これらを踏まえ、チューブ材質および内径選定のための予備実験を行った。

まずチューブ材質選定について述べる。チューブディス

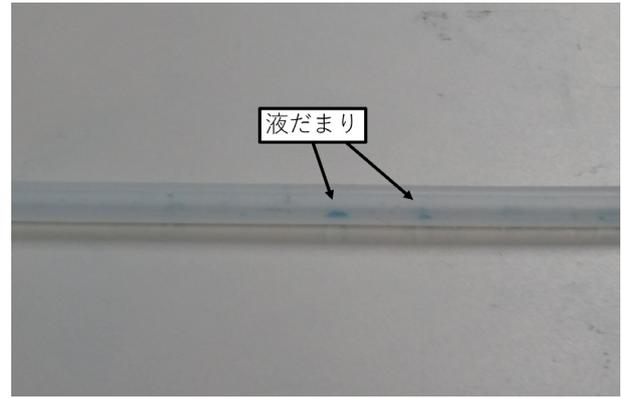


図 3 シリコンチューブにおける液だまり

表 1 チューブ内径と層の移動距離の関係

チューブ内径 [mm]	平均 [mm]	標準偏差 [mm]
2	605	6
3	263	2
4	147	3
5	96	2

プレイ TuVe ではチューブ内を着色液の層が何度も通過するので、それぞれの層がその長さを変えずに通過させることが必要である。そこで、チューブ内に層を複数回通過させ、その変化を観察する。

チューブを直線状に設置し、ポンプ PT-HP1-11-KA を接続する。内部に 20 mm の着色層を作成し、ポンプを駆動して層を移動させ、チューブ内を通過させる試行を連続して行い、チューブ内の様子を目視で確認する。チューブは内径 3 mm のシリコンチューブ、PFA チューブに関して実験し、試行はそれぞれ 100 回ずつ行った。結果として、シリコンチューブの 87 回目の試行において図 3 に示すような液だまりの発生を確認でき、その後の試行においても層の通過後のチューブに液だまりが残ることを確認した。PFA チューブにおいては、100 回の試行後も液だまりは目視できなかつた。したがって、シリコンチューブは液体が多数通過した場合にぬれ性が増加し、同じチューブを継続的に用いることは難しいと考えられる。そこで、システムの構成要素として PFA チューブを用いることとする。

次に、チューブ径の選定について述べる。チューブを直線状に設置し、ポンプ PT-HP1-11-KA を接続する。20 mm の着色層を作成し、十分大きい移動距離が得られるようポンプを 10 s だけ駆動して着色層の移動距離を測定した。チューブは内径 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm の PFA チューブで、測定は 5 回ずつ行った。結果として、層の移動距離は表 1 の通りとなった。

移動距離は内径 2 mm のチューブにおいて著しく増加しており、移動距離の標準偏差が 6 mm となり、内径 3 mm のチューブの場合と比較してばらつきが増大した。液層を正確にコントロールするためにはポンプの駆動時間に対し

\*1 [https://www.tsukasa-d.co.jp/dcms\\_media/other/tube-pump.pdf](https://www.tsukasa-d.co.jp/dcms_media/other/tube-pump.pdf)

できるだけ移動距離が短く、ディスプレイの解像度の高さの観点からできるだけ内径の小さいものが望まれる。したがって、本研究では内径 3 mm, 外径 4 mm のナフロン PFA チューブ (ニチアス) を用いる。

### 3.2.2 合流部分の構成

本システムでは合流部分を通して水、空気が交直流の状態ディスプレイ部に流入する。複数の流体を流路に交互に流す手法として静的な流路によるものと動的な流路によるものが知られている。三方に枝分かれした流路のうち一方に液体、もう一方に気体を同時に流すことで残りの一方に水と空気が合流して流れる。ある条件では液体、気体が交互に分離された層の状態流れ込むことが知られている [8]。静的な流路では流量や合流部分の形状などの条件により交直流を作るが、液層長などをコントロールできない。本研究では提示したい情報に合わせて層の長さを柔軟に制御できる必要がある。そこで、より細かい制御を行いやすい、流路を動的に制御する手法を用いる。動的な流路の制御には、電気信号により内部のソレノイドを操作して接続した流路の開閉を制御する電磁弁を用いる。電磁弁により動的な流路を作成して化学反応を促すシステムに関する研究も行われている [9]。

合流部分の構成は、図 4 に示すような三方電磁弁に流体とディスプレイ部を直接接続する構成と、図 5 に示すような二方電磁弁をそれぞれの流体に接続して Y 字管によって 2 流路を合流させディスプレイ部に接続する構成が考えられる。三方電磁弁を用いる利点としては、流路を一つの電磁弁で制御できるため制御が単純であることが挙げられる。二方電磁弁を用いる利点としてはまず、両方の流路を開放することや両方の流路を閉鎖することなど、幅広い制御が可能であることが挙げられる。また、流路の数を拡張することが容易である。本研究では、拡張性や制御の自由度の高さの観点より二方電磁弁によって合流部分を構成する。

### 3.2.3 ポンプ接続方式

ポンプ接続方式としては、図 6(a) に示すようにそれぞれの流体に対応したポンプを接続し、流体を押し出してディスプレイ部に流し込む押し出し方式と、図 6(b) に示すように回収容器の側にポンプを接続し、流体を引き込んでディスプレイ部に流し込む引き込み方式が挙げられる。押し出し方式の利点としては、それぞれの流体にポンプを接続するため、流体に合わせて接続するポンプを変えられることが挙げられる。しかし、押し出し方式においては一方のポンプを駆動させることによる圧力が他方の流体への流路にもかかることから、流体の逆流が発生する。引き込み方式では構造上このような逆流は発生しない。また、引き込み方式ではポンプを一つしか用いないため制御がより容易となる。本研究では逆流の防止のために引き込み方式を用いる。

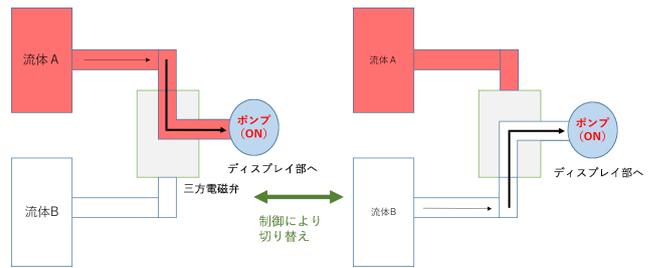


図 4 三方電磁弁による合流部分の構成

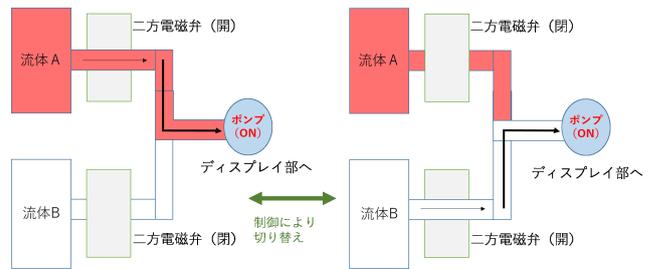


図 5 二方電磁弁による合流部分の構成

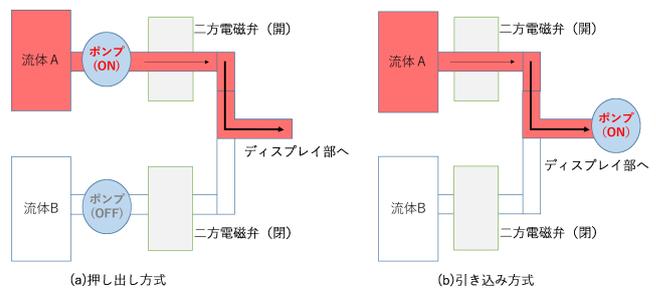


図 6 ポンプの構成

### 3.3 ポンプ駆動時間による流量制御

ディスプレイ部へ流入させる着色層の位置や長さを本研究ではポンプ駆動時間によって制御する。チューブへの流量を  $f[\text{mm}^3/\text{s}]$ 、チューブの内径を  $d[\text{mm}]$  とすると、チューブ内を流体が進む距離は次の式で求められる。

$$\frac{f[\text{mm}^3/\text{s}]}{\pi \times \frac{d}{2} \times \frac{d}{2} [\text{mm}^2]} = \frac{4f}{d^2 \pi} [\text{mm}/\text{s}] \quad (1)$$

よって、チューブの内径、チューブへの流量を固定することでポンプ駆動時間によって着色層の長さや位置を制御することができる。そこで、ポンプ駆動時間によりチューブへの流量を制御できるかを確認するための予備実験を行った。内径 3 mm の PFA チューブを直線状に設置し、チューブ内に 20 mm の着色層を作成する。ポンプをデューティ比 100 % で一定時間駆動させて着色層の移動距離を測定する。ポンプ駆動時間を 4 s から 20 s まで 4 s おきに変動させてそれぞれ 10 回ずつ測定した。結果として、ポンプ駆動時間と移動距離との関係は図 7 の通りとなった。図 7 に示す通り、層の移動距離はポンプ駆動時間に対して線形となった。従って、図中に示す回帰式を用いることで移動距離の制御が可能であると考えられる。

次に着色層の位置制御の精度を評価する実験を行った。

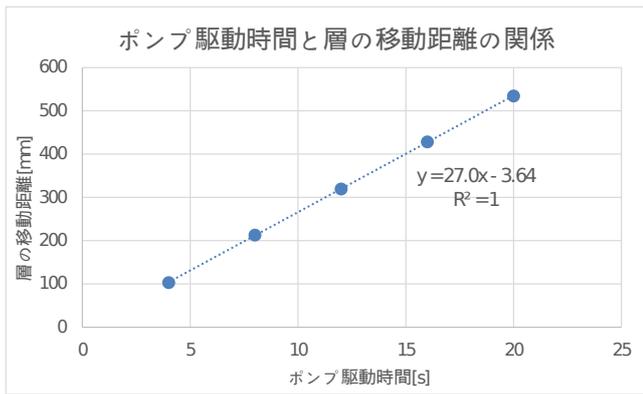


図 7 ポンプ駆動時間と層の移動距離の関係

表 2 層の位置の誤差

移動距離 指定 [mm]	平均 [mm]	標準偏差 [mm]
150	150	2
250	250	2
350	349	2

チューブを直線状に設置してシステムを構成し、チューブ内に 20 mm の層を 1 個作成する。ポンプを一定時間駆動して層を移動させ、その移動距離を測定する。ポンプ駆動時間は 150 mm, 250 mm, 350 mm の移動距離が得られるよう図 7 よりそれぞれ 5.69 s, 9.39 s, 13.10 s とした。得られた移動距離を表 2 に示す。それぞれの場合において得られた平均移動距離は指定した移動距離とほとんど誤差がなく、また得られた結果に対して Z 検定を行ったところ、移動距離の平均は指定した移動距離と有意差が見られなかった。よって、ポンプ駆動時間を制御することで層の位置を正確に制御できる。

### 3.4 着色層の長さ制御

チューブ外径と同様の長さの層を作成することで正方形のピクセルを作成することができる。よって、チューブ外径を着色層の長さの最小単位と考えることができる。従って層の移動よりも小さい単位での流量制御を必要とする。そこで、小さいポンプ駆動時間により層を作成する予備実験を行った。

内径 3 mm の PFA チューブを直線状に設置し、チューブ内に 20 mm の着色層を作成する。ポンプをデューティ比 100 % で一定時間駆動して層を作成し、その長さを測定する。ポンプ駆動時間を 0.1s から 1.0 s まで 0.1s ずつ変動させ、それぞれ 5 回ずつ測定した。結果を図 8 に示す。図 8 より、層の長さはポンプ駆動時間に対して線形に変動したため、得られた回帰式を用いることで層の長さの制御が可能である。

そこで、時間ベースで任意の長さの着色層を作成できることを確認するために実験を行った。提案システムでは外径 4 mm のチューブを用いるため、4 mm 長の層を作成す

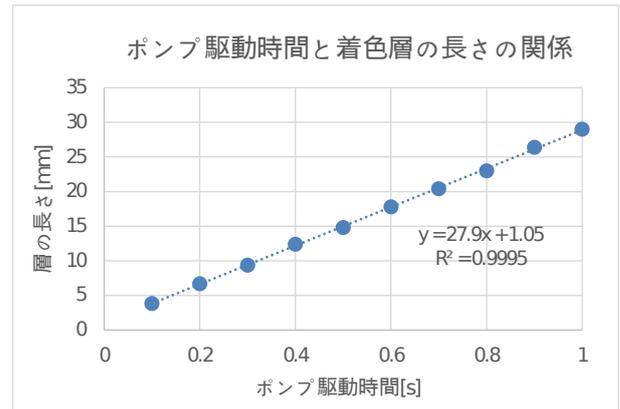


図 8 ポンプ駆動時間と着色層の長さの関係

表 3 着色層の長さの制御 実験結果

ポンプ駆動時間 [s]	層の長さ 平均 [mm]	標準偏差 [mm]
0.11	4	2
0.25	8	2
0.39	12	2
0.54	16	2
0.68	20	2

ることにより正方形のピクセルを表現することができる。そこで、4 mm 単位で層を作成できるかを確認する。

直線状にチューブを設置してシステムを構成し、一定時間ポンプを駆動することで層を作成する。作成した層をディスプレイ部に流入させ、層の長さを測定する。層を作成するためのポンプ駆動時間は 4 mm から 20 mm まで 4 mm ごとの長さの層を作成するために図 8 より、0.11 s, 0.25 s, 0.39 s, 0.54 s, 0.68 s の 5 種類とした。それぞれのポンプ駆動時間に関して 10 回ずつ測定した。表 3 に得られた層の長さの平均、標準偏差を示す。それぞれのポンプ駆動時間において良好な結果が得られた。また得られたデータの平均に関して Z 検定を行ったところ、いずれの場合においても有意差は見られなかった。従って、ポンプ駆動時間によって 4 mm 間隔で層の長さの制御が可能であることが示された。

### 3.5 着色層の位置制御

着色層の位置を制御する手法に関して検討する。

上述のように着色層の移動距離はポンプ駆動時間に対して線形に変化することが確認された。よって、着色層の移動距離制御をポンプ駆動時間の制御によって行うことを考える。そこで、チューブの曲がりや着色層長、着色層数が移動距離に与える影響について実験を行った。

#### 3.5.1 情報提示に必要な長さにおける移動距離制御

提案システムをディスプレイとして利用するとき、情報の提示のためにディスプレイ部として十分長いチューブが必要となる。ここで、システムを用いて文字情報を提示することを考える。文字による情報を小さい解像度で提示で

きるフォントとして美咲フォントが存在する。これは JIS 第二水準のうち一部の記号を除く全ての文字を  $7 \times 7$ px で表現でき、文字間のスペースを含め  $8 \times 8$ px の情報提示を可能とするフォントである\*2。そこで、 $7 \times 7$ px の解像度によりディスプレイとして文字を提示できると考えられる。外径 4 mm のチューブを使用チューブの最小曲げ半径である半径 20 mm の円筒に 7 周巻きつけることで  $7 \times 7$  px の情報を提示するとき、巻きつけに要するチューブの長さは 968 mm である。よって、968 mm が情報の提示のために最低限必要なチューブの長さであると考えられる。情報提示に必要な長さのチューブにおいて層の移動距離を制御できるかを確認するための実験を行なった。チューブを直線状に設置してシステムを構成し、チューブ内に 20mm の層を 1 個作成する。ポンプを一定時間駆動して層を移動させ、その移動距離を測定する。ポンプ駆動時間は 1000mm の移動距離が得られるよう図 7 より 37.2s とし、測定は 10 回行った。結果として得られた移動距離の平均は 999mm、標準偏差は 3mm となった。得られた移動距離は指定した移動距離と大きな誤差がなく、また得られた結果に対して母平均を 1000mm と仮定して Z 検定を行ったところ、移動距離の平均は指定した移動距離と有意差が見られなかった。また、外径 4mm のチューブにおいて正方形のピクセルを作成する場合、1px あたりの長さは 4mm となる。これに対して得られた標準偏差は 3mm であり、1 文字を提示するのに必要な長さのチューブにおいても 1px 以内の標準偏差となった。よって、ディスプレイとして情報を提示するのに最低限必要な長さのチューブにおいても十分な精度が得られると考えられる。

### 3.5.2 チューブの曲がりによる移動距離への影響

まず、チューブの曲がりによる移動距離への影響を確認するための実験を行った。PFA チューブを図 9 に示すように円柱の半周に沿うように設置する。円柱の半径は使用するチューブの最小曲げ半径に近い曲げ半径を再現するために 22 mm とした。\*3

チューブ内に 20 mm の着色層を作成して図 9 中の①の位置へ着色層を移動させる。その位置から円柱の半周を十分通過できるように、層が 300 mm 移動する(図 9 中の②の位置)ようにポンプを一定時間(11.25s、図 7 内の回帰式より)駆動させ、その移動距離と標準偏差を求めた。また、比較のために、直線状のチューブにおいてポンプを同時間駆動して層を移動させ、その移動距離を測定した。結果を表 4 に示す。移動距離に大きな差は見られず、得られたデータに対して t 検定を行ったところ有意差は見られなかった( $p=0.96$ )。よって、チューブの曲がりによる層の移動距離への影響を考慮する必要はないと考えられる。

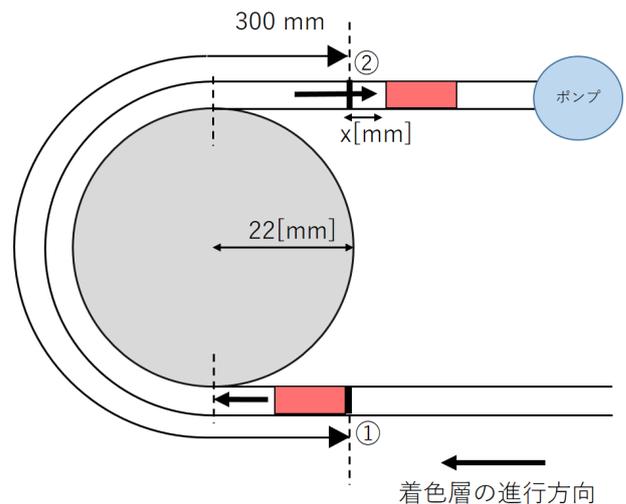


図 9 曲線実験の概要

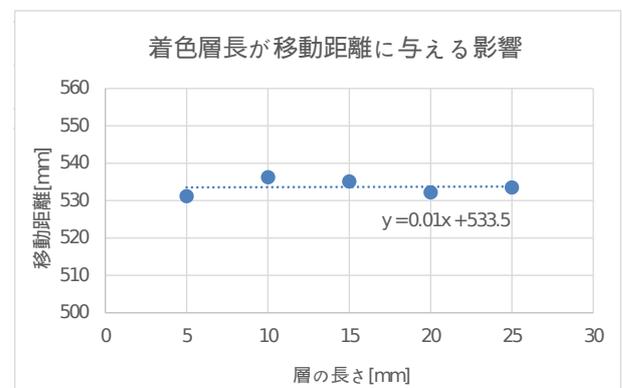


図 10 着色層長と移動距離の関係

### 3.5.3 着色層長による移動距離への影響

次に、着色層長が移動距離に与える影響を確認した。PFA チューブを直線状に設置した後、チューブ内に着色液の層を作成し、ポンプを 20 s 駆動してその移動距離を測定する。作成する着色液の層の長さを 5 mm から 25 mm まで 5 mm ずつ変動させ、測定は 5 回ずつ行った。結果を図 10 に示す。図 10 より、着色層長を変動させても移動距離には大きな変化は見られなかった。よって、着色層長は移動距離に対して影響を与えないと考えられる。

### 3.5.4 着色層の数による移動距離への影響

また、着色層の数が移動距離に与える影響を確認した。PFA チューブを直線状に設置した後、チューブ内に複数個の着色液の層を作成し、ポンプを 20 s 駆動してその移動距離を測定する。移動距離を測定する着色層の前方にあらかじめ複数の着色層を作成した場合の移動距離を、単一の着

表 4 曲線状のチューブにおける層の移動距離

	平均 [mm]	標準偏差 [mm]
曲線	301	3
直線	301	5

\*2 <http://www.geocities.jp/littlimi/misaki.htm>

\*3 <http://www.nichias.co.jp/products/download/PDF/T44.PDF>

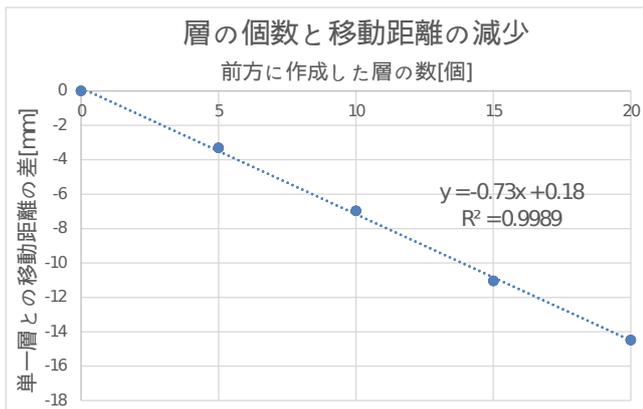


図 11 着色層の個数と移動距離の関係

色層を移動させた場合の移動距離と比較する。前方に存在する着色層の個数を 0 個から 20 個まで 5 個おきに変動させ、測定は 5 回ずつ行った。結果として、図 11 のような移動距離が得られた。図 11 に示すように、着色層の個数に対して移動距離が線形に減少することが分かった。したがって、複数個の着色層を同時に位置制御する場合には、この移動距離の現象を考慮する必要がある。

## 4. 考察

### 4.1 着色層の長さや位置の制御について

前述の実験により、単一の着色層を制御する場合においては、ポンプ駆動時間によって良好な精度で着色層の長さや位置を制御でき、チューブの曲がりや層の長さは移動距離には影響を与えないことが分かった。また、ディスプレイ部内に複数の着色層が存在する場合は個数が大きくなると移動距離が小さくなることが分かった。これはディスプレイ部内に存在する水と空気による交互層によってポンプによる圧力が低下したことによるものと考えられる。移動距離の減少量は着色層の個数に対して線形であるため、複数の着色層を移動させる場合は結果に従ってポンプ駆動時間を補正することで、正確な移動距離を制御できると考えられる。以上のように、今回確認した条件においてはポンプ駆動時間によって着色層の位置制御が可能であることが示された。

### 4.2 システムの制約

提案システムの制約として、着色層の移動にかかる時間の長さが挙げられる。図 7 に示すように、着色層を 27 mm 移動させるためにはポンプを 1 s 駆動させる必要がある。提案システムをディスプレイとして利用するとき、3.5.1 節で述べたように巻きつけに要するチューブの長さは 1106 mm である。着色層を 1106 mm 移動させるためにはポンプを 40.8 s 駆動する必要がある。このように、使用するディスプレイ部の長さによって着色層の移動に必要な時間が決定し、これがディスプレイとしての反応速度の制約と

なる。

### 4.3 応用

提案システムはフレキシブルなチューブを用いることで様々な表面形状での情報提示を可能とする。その応用としてまず、物体にチューブを巻きつけることでその物体に情報を重畳させることが挙げられる。スマートフォンなどの身近な物体に巻きつけることでダイナミックにその絵柄を変えることのできる装飾システムとして利用することや身体に巻き付けてウェアラブルなディスプレイとして活用することなどが用途として考えられる。

また、様々な表面形状の物体への情報の重畳を可能とするプロジェクションマッピングは、ショーや芸術作品、企業のプロモーションなどの分野で採用されている。提案システムは、流体によって情報を提示することでプロジェクションマッピングに存在する制約を回避しつつ立体への情報提示を可能にする。従って、デジタルサイネージなど、注目を必要とする分野におけるより一般的な情報提示手段として用いることができると考えられる。

またチューブや流体の性質を利用することで様々な用途を考えることができる。例えば、透明なチューブを適切な屈折率の液体に浸すことでチューブを視認できなくすることが可能であると考えられる。液体中のチューブの内部に様々な液体を流すことで、液体中を液体が移動するといった表現を可能とする。これにより噴水やアクアリウムなど、液体を用いたシステムにおける新しい情報提示手段としての利用が考えられる。

さらに、システムに用いるチューブや流体の種類を変えることで、システムをより様々な用途へ適用できる。まず、チューブ形状を特定の形状に変えることで特定の用途に用いることが考えられる。例えば、サングラスの形状のチューブをユーザに装着してもらい、チューブ内に着色液を流すことで動的に色を制御できるサングラスを実現できる。次に、チューブ内に流す液体の種類を変えて提示する情報の種類を変えることが考えられる。例えば、チューブ内に発光液を流すことで発光を提示することが考えられる。これにより暗い環境下での情報提示を可能とし、夜間の路上における通行人への注意喚起や情報提示などの利用を可能とする。またディスプレイ部に流入させる流体の温度を制御することで、巻きつけた物体に温度に関する情報を付与することや、体に巻き付けたディスプレイの温度を変化させることで仮想の温感を直感的に提示するなど、温度ディスプレイとしても利用できる。

### 4.4 今後の課題

提案システムをディスプレイとして用いるために解決すべき課題を述べる。まず、複数の層の位置を同時に制御する手法を検討することが挙げられる。現在の提案システム

では、すべての層を一本のチューブ内に保持することを前提としている。よって、ポンプを駆動して層を移動させるとき、チューブ内に存在する全ての層が移動することとなる。従って、複数の層の位置を制御するには、それぞれの層が最終的に指定した距離だけ移動できるようにポンプ駆動時間を割り振る必要がある。

また、より多くの情報を提示するために複数の文字を提示することも課題として挙げられる。例として、単一のシステムにおいて円筒にチューブ巻きつける形状で複数の文字を提示することを考える。このとき、手法として主に円筒への巻き数を大きくして文字を縦に並べる手法、巻きつける円筒の半径を大きくして文字を横に並べる手法などが考えられる。3.5.1 節で述べたように、文字間のスペースを含め  $8 \times 8\text{px}$  の文字の提示を可能とするフォントが存在する。したがって、まず文字を縦に並べる場合、1文字ごとにチューブを8巻きする必要があるため、 $n$ 文字を提示する場合  $1106n[\text{mm}]$  のチューブが必要となる。また、文字を横に並べる場合、 $n$ 文字に対して少なくともチューブ一周を  $8n[\text{px}]$  分、すなわち  $32n[\text{mm}]$  以上にする必要がある。よって、 $n$ 文字を提示する場合  $256n[\text{mm}]$  のチューブが必要となる。従って、文字を横に並べる手法を用いることにより、必要なチューブの長さを小さくすることができる。以上で求めた必要なチューブ長の範囲内で層の位置を適切に制御することによって複数文字の提示が実現できる。

より大きな規模のシステムにおいて精度を向上させる手法として、層の移動時間のキャリブレーションを行うことが挙げられる。これは層を1つ作成してディスプレイ部全体を移動させ、その位置をリアルタイムに取得し、層の移動時間と層が到達した位置の関係を記録する。そして、上記の操作で得られたデータに従って、層を特定の位置に移動させるために必要な移動時間を算出することで実現できる。これにより、任意のチューブ形状において層の移動時間を算出できるようになり、大きな規模のシステムにおいてもチューブ形状に起因する誤差を低減できる。

## 5. おわりに

本稿では、チューブディスプレイ TuVe の実現に必要な要素に関して議論し、システムの実装とその制御手法を検討した。さらに、その機能を評価するために提案システムによって実際に層の長さ、移動距離を制御した。結果として、指定した層の長さを作成すること、指定した位置に層を移動させることができた。今後は、課題として挙げた複数層の位置制御に関する検討とより大規模な環境での位置制御の検討を進め、提案システムによる情報提示の実現を目指したい。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP15H01679 の助成を受けた。

## 参考文献

- [1] Follmer, S., Leithinger, D., Olwal, A., Hogge, A. and Ishii, H.: inFORM: Dynamic Physical Affordances and Constraints Through Shape and Object Actuation, *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, pp. 417–426 (2013).
- [2] Schoessler, P., Windham, D., Leithinger, D., Follmer, S. and Ishii, H.: Kinetic Blocks: Actuated Constructive Assembly for Interaction and Display, *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, pp. 341–349 (2015).
- [3] Asayama, H., Iwai, D. and Sato, K.: Diminishable Visual Markers on Fabricated Projection Object for Dynamic Spatial Augmented Reality, *SIGGRAPH Asia 2015 Emerging Technologies*, SA '15, pp. 7:1–7:2 (2015).
- [4] Kojima, Y., Fujimoto, T., Itoh, Y. and Nakajima, K.: Polka Dot: The Garden of Water Spirits, *SIGGRAPH Asia 2013 Emerging Technologies*, SA '13, pp. 15:1–15:2 (2013).
- [5] Nakagaki, K., Totaro, P., Peraino, J., Shihpar, T., Akiyama, C., Shuang, Y. and Ishii, H.: HydroMorph: Shape Changing Water Membrane for Display and Interaction, *Proceedings of the TEI '16: Tenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '16, pp. 512–517 (2016).
- [6] Kuriyama, T.: Tokyo Arteria, papyri.net (online), available from (<http://en.papyri.net/artworks/tokyoart>) (accessed 2017-10-18).
- [7] 裕康永瀬：マイクロリアクターの開発と応用，*生物工学会誌：seibutsu-kogaku kaishi*, Vol. 87, No. 1, p. 15 (2009).
- [8] Sotowa, K.-I.: Fluid Behavior and Mass Transport Characteristics of Gas - Liquid and Liquid - Liquid Flows in Microchannels, *JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING OF JAPAN*, Vol. 47, No. 3, pp. 213–224 (2014).
- [9] 門脇信傑，鈴森康一：スラグ化学プロセス用スライド式三方弁の開発，*日本機械学会論文集C編*, Vol. 78, No. 785, pp. 305–311 (2012).