

コンテンツ論文

直動アクチュエータと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"Volflex+"の開発

圓崎 祐貴^{*1} 矢野 博明^{*1} 岩田 洋夫^{*1}

Development of Volflex+ with liner actuator and balloons

Yu-uki Enzaki^{*1}, Hiroaki Yano^{*1} and Hiroo Iwata^{*1}

Abstract — This paper presents a work carried out for a project to develop a new interactive technique that combines haptic sensation with computer graphics. The project has two goals. The first one is to provide users with a spatially continuous surface on which they can effectively touch an image using any part of their bare hand, including the palm. The second is to present visual and haptic sensation simultaneously by using a single device that doesn't oblige the users to wear any equipment. In order to achieve these goals, we have developed balloon array volumetric haptic display named Volflex. The Volflex, however, has small range of displayed volume. In this paper, we focus on expanding the ability to present varied shape of virtual object from flat surface to volumetric surface. We designed a new volumetric haptic display named Volflex+. It is composed of a group of air balloons controlled by air cylinders. Each air cylinder is attached to a linear actuator so that each balloon is able to move up/down. This configuration drastically expands presented volume..

Keywords: haptics, 3D-shape, volume

1 はじめに

コンピュータ上のバーチャル物体を提示する装置として視覚、聴覚、力触覚、味覚、嗅覚など様々な感覚を単独あるいは組み合わせて提示する装置が開発されている。中でも力触覚を提示するハプティックデバイスは、視覚など他の感覚の提示装置と組み合わせ、産業用製品の3次元形状設計や手術支援、アミューズメントやアート作品への応用が期待されている。本研究では特に、3次元形状設計のイメージスケッチ作成のような初期段階の構想を固める際に、粘土をこねるようにイメージを具現化するようなシーンへの適用を想定する。

ハプティックディスプレイは大きく分けて3つに分けることができる。体験者に装着して使用する装着型[1][2]、体験者が装置の一部を道具のように持った状態で使う道具媒介型[3][4][5]、物体そのものの形状等を装置で実空間に再現し、それに触ることで力覚を与える対象指向型[6][7][8][9][10][11][12]などがある。

粘土をこねる作業を想定した場合にもっとも適していると考えられる対象指向型は、手に装着したり把持する必要が無く、実物体を触ると同様な触覚体験が得られる。

対象指向型は直動アクチュエータアレイを用いたFEELEX(図1左)などの面型ハプティックディスプレイと体積型ハプティックディスプレイと呼ばれる提示部にバルーンを複数用いたVolflex(図1右)[13]などがすでに

開発されている。面型ハプティックディスプレイは数ミリ間隔で物体の鉛直方向の凹凸を表現可能である。しかしながらロッドの伸縮を用いた構造から、側面方向も含めた凹凸形状の提示は実現されていない。

一方、体積型ハプティックディスプレイはバルーンの大きさを制御して形状を再現するため、物体を上面だけでなく側面形状の提示も可能で掴むことを可能にした。しかしながらバルーンのみ膨張収縮のため、バルーンの初期配置により提示可能な形状が限定される。さらに最小体積時に面型ハプティックディスプレイのように体積0の状態にならない。また、バルーンは膨張収縮のみでネットで覆われているため容易にバルーンの集合体であることが一般の体験者でもすぐわかり、割れやすく壊しやすいイメージから触る・体験することへのためらいも起きやすい。



図1 FEELEX(左) Volflex(右)

Fig.1 FEELEX(Left) Volflex(Right)

以上のことから3次元形状設計に対象指向型ハプティックディスプレイを適用する場合には、提示可能形状のさらなる多様化が必須と言える。

そこで、本研究では提示可能な形状のバリエーションを増やす方法として、個々のバルーンの高さを制御する機構を付加する方式を提案する。バルーンを床下まで移動することで、体積 0 状態も実現可能で、面型ハプティックディスプレイと体積型ハプティックディスプレイの両方の特性を併せ持ったディスプレイが実現できる。



図2 Volflex+

Fig.2 Volflex+

本論文では、バルーンの配置の検討を含めた提案手法の理論的有効性を検証し、バルーン移動用 10 個、バルーン膨張収縮用 10 個の合計 20 個のアクチュエータを用いた試作システム”Volflex+”(図 2)を実装した。基本性能の評価とともに、展示を通じて装置の耐久性および、一般の来場者に対して自然な触覚体験を提供できることを確認した。

2 Volflex+の基本概念

2.1 解決すべき課題

前述のように従来の面型ハプティックディスプレイは物体を一方向から見たときの凹凸形状とそれを押したときの硬さなどを表現することが得意であるがアクチュエータ方向の変形しかできず、側面の形状提示は困難である。

一方、Volflex など複数バルーンの体積制御による体積型ハプティックディスプレイは側面の形状も表現できるものの、バルーンの初期位置によって提示可能な形状が限られる。また、バルーンの最小体積時の大きさが存在するため何も無い状態から提示面を形成することができない(図 3)。さらに小型バルーンを多数用いることが容易にわかり、壊れることを懸念して触ることをためらいがちになる。

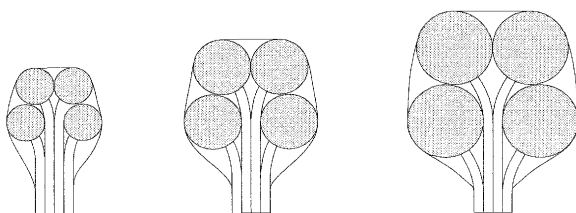


図3 Volflex の形状提示能力

Fig.3 Transformation of Volflex(image)

2.2 方策

そこで、本研究では図 4 に示すようにそれぞれのバルーンの大きさと位置を独立して制御させることで多様な形状を提示することとした。図 5 に示すように、バルーンの位置の制御を加えることにより平面から盛り上がる変形も可能となる。

これらを面型ハプティックディスプレイで実現するためにはロッドの軸方向を複雑に配置しなければならず、場合によってはロッドの軸方向を平行ではなくそれぞれ相対的に角度を持たせるような機構が要求される。これを実現するのは困難であることが容易に想像できる。そのためバルーンの体積制御という課題を考慮しても Volflex+の方策がより実現性が高いと言える。なお、鉛直方向への移動だけではなく水平方向への移動機構を導入することも考えられるが、実装が複雑になるため、本研究では鉛直方向のみの移動を対象とした。

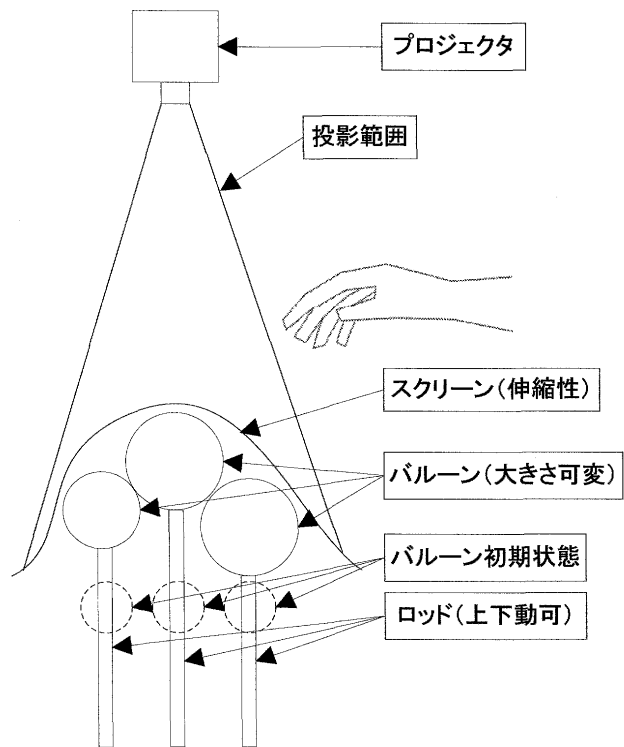


図4 システム基本構造

Fig.4 Basic structure of the Volflex+

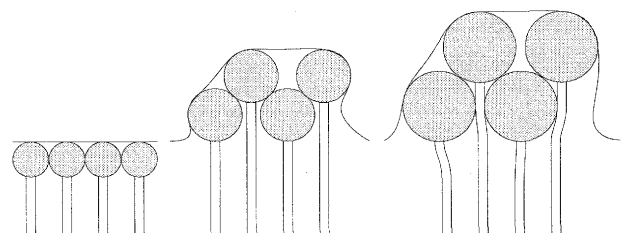


図5 Volflex+の形状提示能力

Fig.5 Transformation of Volflex+(image)

3 バルーン配置

バルーンの配置が提示可能な形状に大きく影響するため、バルーン的位置が変わることを想定して、さまざまな配置を検討した。本研究では入手が容易な市販の物を使用するため使用するバルーンの最大時の直径は40mm、ロッドの直径を6mmという条件を設定した。

この条件下でバルーン最小体積時に平面とすることと体積変化範囲(最大体積と最小体積の差, 以下体積変化範囲)を従来より大きくすることの2点に重点を置いて実装の容易さなども加味しながら検討した。なお、アクチュエータでバルーンを動かせば極端な例では、可動範囲の下限と上限にそれぞれ移動したときの包絡面で囲まれた体積が最大体積となるが、ここでは提示形状の剛性を高くするために、バルーン最大時に近隣のバルーン同士が接触した状態を指すものとした。

まず図6のような面心立方格子構造を元にしたロッド配置を考案し検討した。

ロッドの配置を格子状に配置すればよいため、直動アクチュエータ部の機構が比較的シンプルなものでも済み実装しやすいという特徴がある。

しかし最大体積時に高さが低く水平面のバルーン密度があまり高くない上にロッド間隔を狭めにくいという問題が発生した。

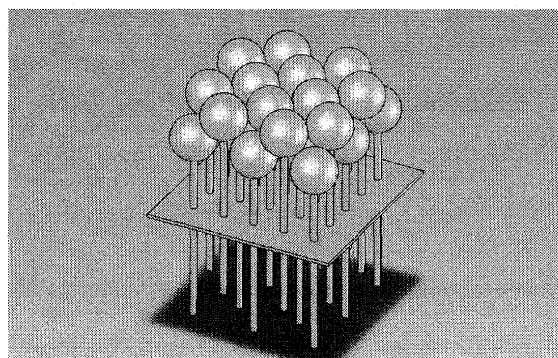


図6 面心立方格子構造

Fig.6 Face-centered cubic

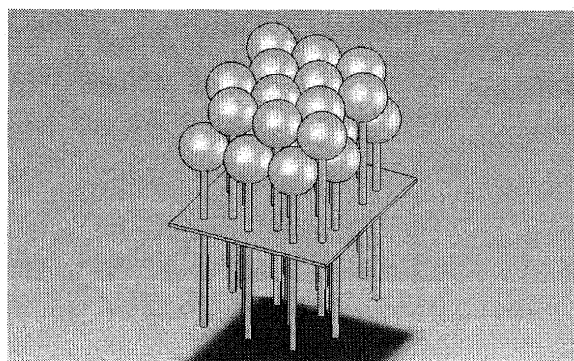


図7 六方最密充填構造

Fig.7 Close-packed hexagonal lattice

次にロッド間隔を狭めることを目的として図7のように六方最密充填構造の配置を考案し検討した。この構造

は面心立方格子構造と同様上下の二層構造である。

層単体で比較すれば単位面積当たりのバルーンの数には六方最密充填構造のほうが多いものの充填率はどちらも同じである。ロッドの配置が変則的となるため直動アクチュエータ部の機構が比較的複雑となる。

しかしながら、いずれもバルーンの膨張収縮をロッドが遮らないようにすると三層以上に拡張できない。さらに同一の層のバルーン同士は接することはあっても、膨張にしたがって他のバルーンを押し出す(以下、バルーン同士の接触)ことがない。バルーン同士の接触判定を単純化することができる反面、バルーン自体の膨らむという特性をうまく体積変化に生かしきれない

そこでバルーン同士の接触判定の単純化よりもバルーン自体の特性を生かすことを優先し、図8 図9 に示すような配置を考案した。

この配置はロッドを最大時のバルーンの半径とロッドの半径を足した長さ、つまり23mmの間隔で格子状に配置し、バルーン同士が接触しないようにロッドの高さを調節した配置である。構造上の問題から前に挙げた二つの配置よりもロッドの可動範囲を大きく確保する必要がある。

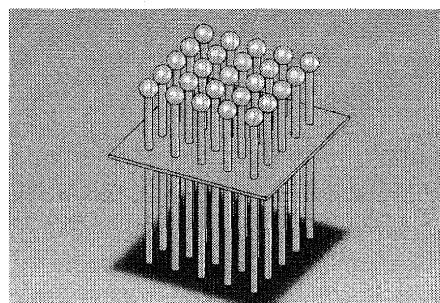


図8 バルーン配置(バルーン体積最小, ロッド初期位置)

Fig.8 Configuration of balloon(minimum volume)

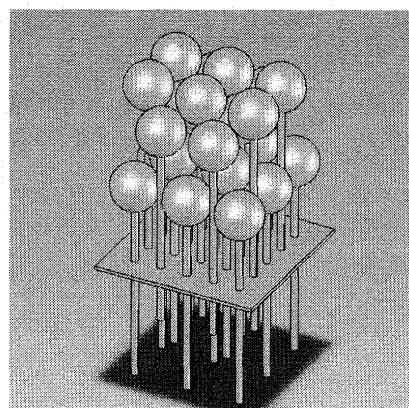


図9 バルーン配置(バルーン体積最大)

Fig.9 Configuration of balloon(maximum volume)

しかし本研究では、使用する直動アクチュエータに市販品を使用し、かつバルーン数を10個に限って信頼性の高い制御システムの構築のため10個のバルーンを用いた別の配置を考案した。具体的な構造は4章で説明するがロッドの配置を一边23mmの正八角形にす

ることで直動アクチュエータ同士の配置の相互干渉を回避し内部に 2 個分をロッド延長により直動アクチュエータを外周の 8 個と高さをずらして直動アクチュエータ同士の相互干渉を回避する図 10 のような配置をとった。

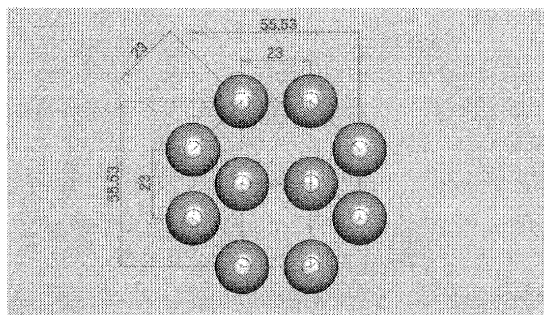


図10 ロッド配置

Fig.10 Configuration of rods

表1 体積変化範囲の比較

Table 1 Volume Range

	最小体積 (mm ³)	最大体積 (mm ³)	最小時面積 (mm ²)
FEELEX	0	4608	576
Volflex	1172	3267	156
Volflex+	0	1352	49

ここで、Volflex+と FEELEX, Volflex の体積の変化範囲を表 1 に示す。なお、この値は寸法から算出した理論値である。構築したシステムの大きさが異なるためそのまま単純に数値比較することは出来ない。また、表 1 の数値から最大体積と最小体積の比を求め Volflex+と FEELEX, Volflex とを定量的に比較することも考えられるが Volflex 以外の最小体積が 0mm³であるため比が無窮大となる。高さ方向の変形の比で比較することも考えられるが FEELEX 以外は水平方向への膨張収縮があるため、装置の特徴を反映した数値とならない。

そこで形状変化のダイナミックレンジを同じ基準で評価するため次式にあてはめて正規化することとした。

体積フットプリント比 =

提示体積(mm³)

最小体積時のフットプリント(mm²)

この値(以下、体積フットプリント比)は、高さ方向と水平方向それぞれの形状の変化幅を含んだ値となり、本装置の特徴を表す数値と言え。最大体積と最小体積時の体積フットプリント比の範囲をダイナミックレンジと定義してグラフにした(図 11)。なお、Volflex のチューブ支持部は図 3 のようにチューブ間隔 6mm で小さく束ねられているため比較のために Volflex+の間隔 23mm にそろえて計算した。また、体積フットプリント比は面型ハプティックディスプレイでは同じ体積変化を起こすため

に必要な直動機構に必要なストロークと一致する。Volflex は最小体積時に 0 にならないため、体積変化範囲の下限が 0 にならない。Volflex+は最も体積変化範囲が大きく、また最小体積時に平面となるため、0 となる。

以上より、提案方式によって、最小体積時に平面とすること、体積変化範囲を従来より大きくすることの 2 点の検討項目を満たすことができると言える。

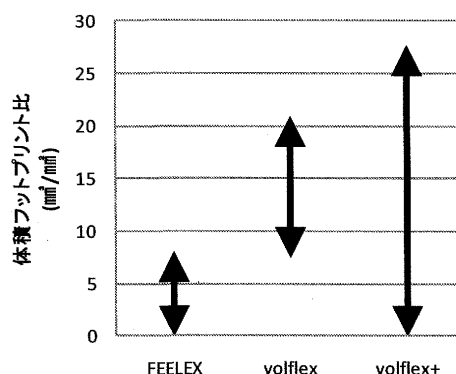


図11 体積フットプリント比のダイナミックレンジ
(mm³/mm²)

Fig.11 Dynamic range of volume/minimum footprint
(mm³/mm²)

4 試作システムの実装

4.1 基本構造

提案手法の有効性を検証するために試作システムを作製した。システムはそれぞれのバルーンの体積と位置を制御するバルーン制御ユニットとそれらを 10 セット組み合わせたフレームからなる。

バルーン制御ユニットは、バルーンを取り付けたロッドとその位置を制御する直動アクチュエータ、シリンジの位置を制御する直動アクチュエータ及びバルーン・シリンジ間のチューブからなる(図 12)。使用した直動アクチュエータは 2 つともに KSS 社製 KUMINA-60-24 で移動速度は 20mm/s である。バルーンの体積はシリンジの位置を直動アクチュエータで変化させることにより制御した。シリンジ部については、バルーンの大きさとシリンジ移動量に関しては図 13 のようになっており、膨らませた回数などによって特性が変化するものの概ねシリンジ移動量に応じてバルーンの大きさを制御できる。

バルーンの位置は、ロッドの位置を直動アクチュエータで制御した。なお、前章で説明した配置の場合すべてのバルーンを最大まで膨張させるとバルーン同士が接触する。ロッド部分を柔軟性のある素材で構成するとロッドが曲がってバルーンが不用意に干渉することが考えられる。そこでロッドを途中まで剛性のあるアルミ製の中空パイプとし、先端部分はある程度の柔軟性を持ったチューブを使用してバルーンと接続した。これにより、

ロッドの上下動をスムーズにし、バルーン同士の干渉を先端チューブ部分で逃がした。また、シリンジと先端チューブは、アルミパイプより一回り細く、ロッドの可動範囲分の余裕を持たせた長さの柔軟なチューブを、パイプ内を通して接続した。

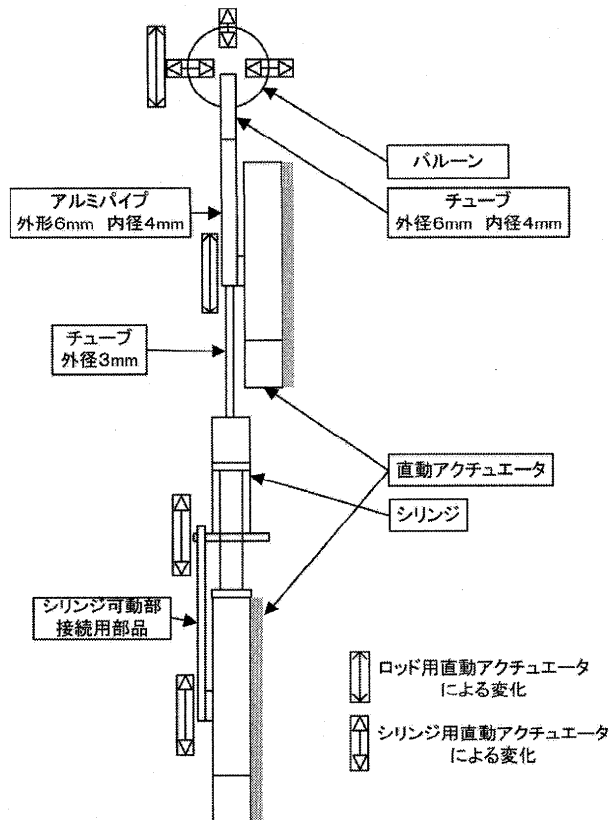


図12 バルーン制御ユニット

Fig.12 Combination of the air balloon and the linear actuator

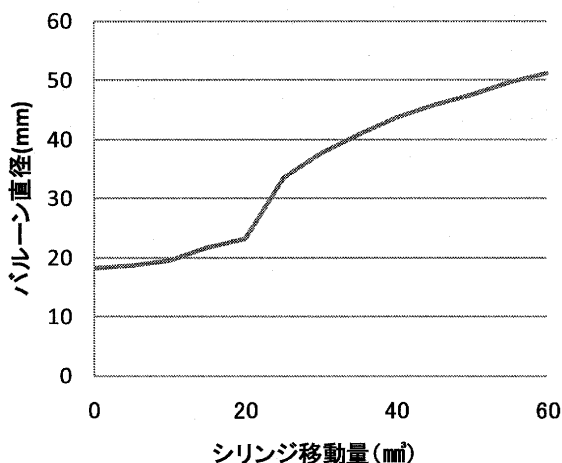


図13 シリンジ移動量とバルーン直径の関係

Fig.13 Relation between the displacement of a syringe and the diameter of a balloon

全体としてはなるべくスペースを節約するため直動機構部とシリンジ部を直線上に配置し外部フレームを用いて図14のように固定した。それぞれの機器の大きさや使用できる数の制限から装置全体で図12のユニットを計10個使用して図14のように全体を構成した。

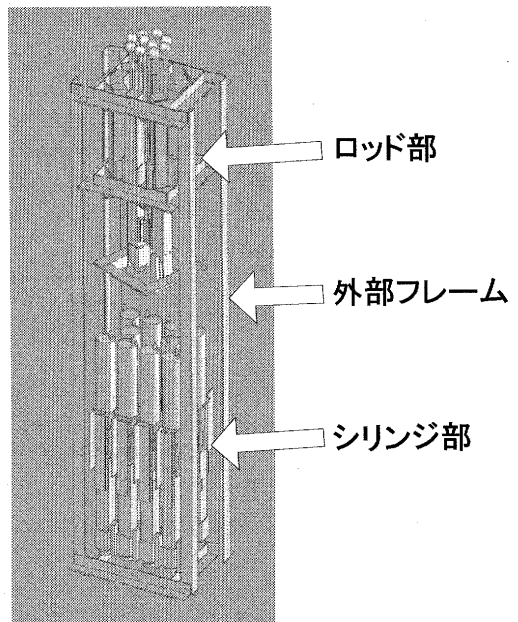


図14 バルーン制御ユニット全体構成

Fig.14 Overall view of balloon control units(Model)

実際に試作した装置の様子を図15に示す。バルーンアレイは穴の空いた黒色板の下に配置し、その穴は伸縮性のある白色の布をゴムで四隅を固定して覆った。バルーンはこの布を押し上げて下からせり上がりこが提示部となる。さらに図15のように装置真上にプロジェクタを配置することで、バルーン包絡面上に映像を提示した。

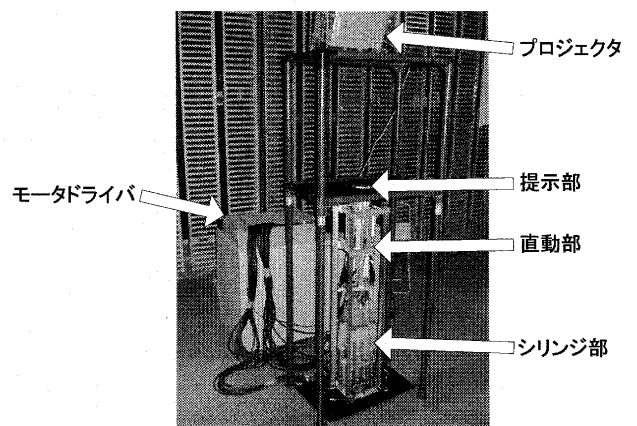


図15 装置外観

Fig.15 Overall view of the Volflex+

4.2 制御システム

4.2.1 デバイスアート・ツールキット

制御システムは開発を効率化するため著者らの研究室で開発中のデバイスアート・ツールキット[14]を使用した。デバイスアート・ツールキットとはPCとの接続にUSBを使用するもので、基板を連結させることで複数枚使用することができる。

機能モジュール基板には dsPIC30F4011 が搭載されている。デバイスアート・ツールキットの dsPIC-PC 間の通信処理は各種 I/O との接続を担当するスレーブ基板

と USB を通して PC と通信するマスター基板をシリアル通信でデータをやり取りしている。スレーブ基板1枚のみの場合の通信レートは 1kHz 以上である。デバイスアート・ツールキットは入力基板、出力基板を変えることで PIO, エンコーダ, AD, DA, PWM などの入出力をサポートする。Volflex+ ではマスター基板を 1 枚、スレーブ基板と PWM 基板をそれぞれ 7 枚組み合わせる上で dsPIC のプログラムを書き換えて使用した。詳しい内容は後述するが Volflex+ の実装では通信レートは 1 動作につき 1 回である。

4.2.2 ソフトウェア構成

本研究では制御 PC からデバイスアート・ツールキットを通してモータドライバを制御する。しかしステッピングモータ用パルス信号の生成を標準ではサポートしていない。そのためデバイスアート・ツールキットに搭載されている dsPIC のプログラムを、タイマ割り込みを使用してパルス信号を生成するプログラムに書き換えて、その信号をモータドライバへ供給しステッピングモータを駆動した。割り込み処理と駆動に必要なパルスの周波数が 10kpps で機能モジュール基板1枚当たり3個までのステッピングモータをオープンループで駆動させた。これは dsPIC—PC 間の通信処理と競合するためパルス生成中は通信できないためである。そのため通信は 1 動作につき 1 回である。なお、Volflex では圧力センサが各バルーンに取り付けられており、ユーザの動作入力を検出する機能が取り付けられていた。本システムにおいても同様のセンサによる入力動作検出が可能であるが、本研究では変形機能の実装を優先させたため、未実装となっている。センサの実装によるインタラクティブな変形については今後の課題である。

5 基本性能評価

試作したシステムの形状提示性能を評価するために、様々な形状を提示しその基本性能を検証した。

提示可能体積について Volflex 試作機はバルーン数 25 個で 270mm^3 から 3267mm^3 であった。本研究の Volflex+ 試作機はバルーン数 10 個で 0mm^3 (図 16) から 1352mm^3 (図 17) となった。Volflex+ のバルーンの最小体積状態から最大体積状態への平均体積変化

速度は $450\text{mm}^3/\text{s}$ であった。

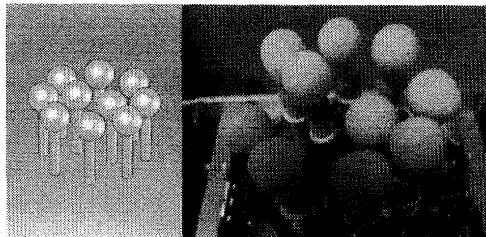


図16 最小状態(右:モデル 左:実機)

Fig.16 Minimum volume(R:Model L:Photo)

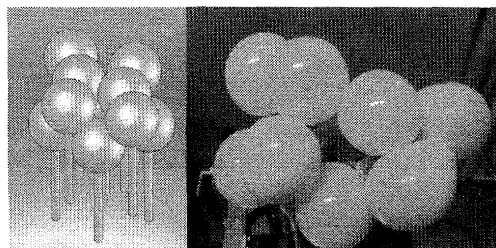


図17 最大状態(右:モデル 左:実機)

Fig.17 Maximum volume (R:Model L:Photo)

最小状態は実機とモデルではほぼ同一であるが最大状態では異なって見える。これはバルーンの素材の不均一性から膨らむ方向にムラがあったことやバルーン同士の摩擦により接触時に動く方向が予測しにくいいため誤差が大きくなったためである。バルーンの個体差に由来するムラであるため、考えられる対策としては予めバルーンを均一に揉み解してムラが起きにくくすることが挙げられる。しかし揉み解しすぎると耐久性が下がってしまうため根本的には素材の段階から検討をしなければならない。本研究では市販品を使ったため素材に制限があるためムラに対する対策として軽く揉み解してから使用した。

また、体積 0 からの提示の性能検証として、図 18 に示すように平面の状態から大きく盛り上がり提示面を形成することができた。また平面から様々な形状に変形させることもできた。平面からの盛り上がりは Volflex では実現できない形状変化であり、またロッドの軸に対して横方向への形状変化は FEELEX などでは実現できない形状変化であることから FEELEX や Volflex などよりも複雑な形状変化を実現するという目的を達成できたといえる。

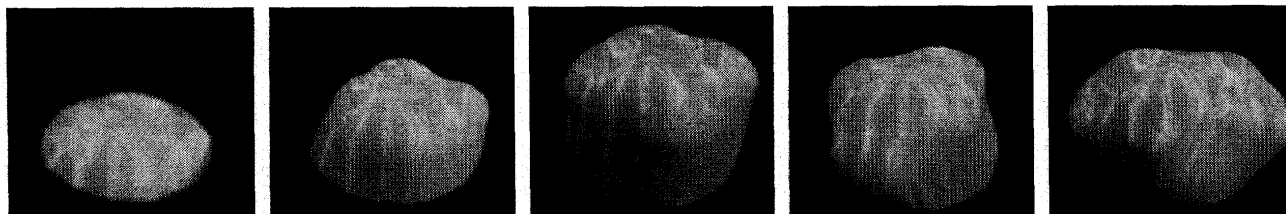


図18 Volflex+の形状変化

Fig.18 Transformation of Volflex+(Photo)

6 展示による評価

移動をともなう変形機能を実装したことによる影響の評価として、バルーンアレイの耐久性に関する評価と未知のハプティックディスプレイにユーザが触ったときの行動を2つの展示会での展示の様子を分析した。なお、より定量的に評価するにはアンケートを採ることが望ましいが、体験者人数が多く、対応人員数の制約があったためにビデオ記録による行動観察を行った。

6.1 ASIAGRAPH2008 における展示

2008年10月23日から26日にかけて日本科学未来館で開催された、ASIAGRAPH2008にて展示を行い、体験者は4日間でのべ1000人程度となった。その時の様子が図19である。

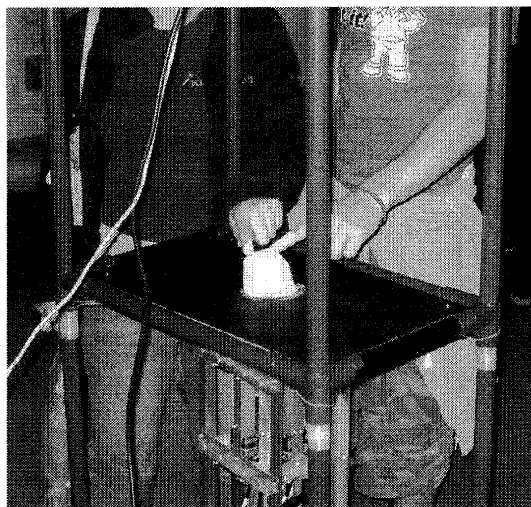


図19 体験の様子(ASIAGRAPH 2008)

Fig.19 Demonstration at ASIAGRAPH 2008

展示ではまだらのような模様を投影しつつ平面から隆起し図18のようにバルーンの位置と大きさを変化させながら、また平面へ戻るといったデモンストレーションを行なった。

体験者がバルーンに触れるやり方を観察した結果、指先、つかむ、つまむ、の順で多い傾向で、両手の場合は1人であった。つかむ、つまむは2人以上同時に触ることができないが、指先でたたくなどの場合は2人以上で同時に触ることができる分多くなったと考える。来場者は科学未来館という場所のため子供もおり、触ってもいいよという何人かの子供たちが我先にと手を伸ばして触っていたことが印象的であった。

6.2 先端技術ショーケースにおける展示

先端技術ショーケースは、文化庁メディア芸術祭の協賛展であり、未来のアート表現に用いられるテクノロジーを紹介することが目的であった。この展示会においても展示を行った。会期は2010年2月3日から2月14日で、会場は国立新美術館である。文化庁メディア芸術祭に

は63,348人の来場者があった。なお、展示時の動作はASIAGRAPHの時と同じである。

文化庁メディア芸術祭の来場者は、前述の、ASIAGRAPHとは異なり技術的知識を持たない一般人が大半である。また、その数が多いため、個別の説明を十分にできる状況にはない(図20)。この展示環境にあつて、Volflex+が平面から盛り上がってくる機能が大きく効果を発揮し、周辺を通過する人々が、形状の変化に気が付き、近くによってくるという現象が多く見られた。

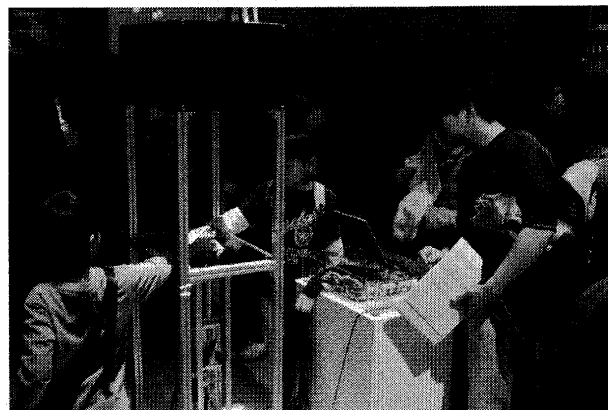


図20 体験の様子(先端技術ショーケース)

Fig.20 Demonstration at Leading Edge Technology Showcase

7 考察

Volflex+はFEELEXとVolflexの両方の特徴を取り入れた装置であり、FEELEXやVolflexなどよりも複雑な形状変化および平面の状態からの大規模な体積変化の実現という2つの目的を達成したといえる。

また2つの展示において、大きな故障もなく展示を実施することができた。展示に耐えられる一定の信頼性を確認できた。さらに、以下のような効果が確認できた。

(1) ASIAGRAPH における展示

FEELEXやVolflexは、装置に触るまではその効果が連想しにくい。手の平で探索するような体験行動が多かったが、Volflex+は立体が盛り上がってきたモグラたたきのように盛りあがる動作から指先で複数回叩いて、形状を確認するといった触り方が目立った。

Volflexとの比較としてVolflexはSIGGRAPH 2005の5日間の日程で体験者は約1300人でVolflex+の4日間で約1000人となっており、1日当たりでほぼ同数の体験者数であった。Volflex+では複数の体験者が同時に触ることがあり、多い時には4、5人が同時に触った。Volflexでは背面が壁になっており1人ずつ体験する展示方法であったため単純な比較はできないが、Volflex+では視覚的な形状変化が格段に大きく多くの人の注意を引く効果と、大変形することからちよつと触った程度では内部が壊れそうにない印象があったことも一因として考えられる。

(2) 先端技術ショーケースにおける展示

Volflex+の視覚的な形状変化は、大規模な展覧会においてさらに効果的で、説明がほとんどできない状況においても多数の来場者の注意を引き、触る体験を誘発することに成功した。

本研究では3次元形状設計に用いるバーチャル粘土の実現を目指している。変形性能の評価の点で最低限の性能は満たしていると言えるが、実用化の観点からは、本装置の解像度は十分とは言えない。今後はさらなる高解像度化、設計対象によっては大規模化が必要と言える。この場合バルーンの数とチューブの敷設のための空間確保、アクチュエータの配置の最適化の問題を同時に解く必要がある。また、単に解像度を上げただけでは角錐の頂点など角張った形状の提示は困難である。解決策の一つとしては、NC工作機械のオートツールチェンジャーのようにバルーン自体を鋭角な形状のバルーンかそれに準ずる物体と交換することや、映像と組み合わせることで人間の視覚優位の特性の利用した擬似的な形状表現などが考えられる。

8 まとめと今後の展望

本研究では、面型ハプティックディスプレイと体積型ハプティックディスプレイなどよりも複雑な形状変化や平面の状態からの大規模な体積変化を実現することという2つの目的を実現するためそれら2つの機構を組み合わせる方法を考案し、試作機を製作し、形状提示機能の検証、ASIAGRAPH及び先端技術ショーケースの2回の展示での運用を通して耐久性や来場者の行動分析により有効性を検証した。

今後の課題としては、圧力センサ等センサ入力機能を追加することでインタラクティブな変形操作の実現が挙げられる。また、映像との組み合わせによる効果に関する研究を行っていきたい。

謝辞

本研究は(独)科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業(CREST)「デバイスアートにおける表現系科学技術の創成」の支援に基づいて行われた。この場を借りて感謝する。

参考文献

- [1] Burdea,G., Zhuang,J., Roskos,E.,Silver,D., and Langlana,L., A Portable Dexterous Master with Force Feedback, Presence, 1(1),pp.18-28(1992)
- [2] Brochure of CyberGrasp, Virtual Technologies, Inc. 1999
- [3] Iwata, H., Artificial Reality with Force-feedback: Development of Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator, ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 24(4), (1990)
- [4] Iwata,H., Pen-based Haptic Virtual Environment, Proc. of

IEEE VRAIS'93, pp.287-292(1993)

- [5] Massie,T., and Salisbury, K., The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects, ASME Winter Annual Meeting, DSC-Vol.55-1, 1994
- [6] 小峯,矢野,岩田:高密度力覚ディスプレイによる弾性分布提示:TVRSJ Vol.11 No.1 pp.115-122(2006)
- [7] 仲谷, 梶本, 関口, 川上, 館:コイル形状記憶合金を用いた3次元形状ディスプレイの研究:映像情報メディア学会誌 Vol.60, No.2, pp.67~9(2006)
- [8] 仲谷, 梶本, Kevin.V,関口, 川上, 館 "高密度ピンアレイによる触覚提示の可能性" in Proc. of JSME Robotics and Mechatronics (ROBOMEC) 2005,
- [9] Iwata,H., et al, Project FEELEX: Adding Haptic Surface to Graphics, Proc. SIGGRAPH 2001, 2001
- [10] Tachi,S., et.al., A Construction Method of Virtual Haptic Space, Proc. of ICAT'94, pp.131-138(1994)
- [11] McNeely, W., Robotic Graphics:A New Approach to Force Feedback for Virtual Reality, Proc. of IEEE VRAIS'93, pp.336-341(1993)
- [12] Hirota, K. and Hirose, M., Simulation and Presentation of Curved Surface in Virtual Reality Environment Through Surface Display, Proc. of IEEE VRAIS'95, pp.211-216(1995)
- [13] Iwata,H., et al, Volflex, SIGGRAPH 2005, Conference DVD, 2005
- [14] 圓崎,佐藤,矢野,岩田:デバイスアート・ツールキットの開発:TVRSJ Vol.15 No.3 pp.417-426(2010)

(2011年3月7日)

[著者紹介]

圓崎 祐貴(学生会員)



2008年筑波大学第三学群工学システム学類卒業。2010年同大学院システム情報工学研究科博士前期課程修了。現在、同大学院システム情報工学研究科博士後期課程在学中。力覚呈示に関する研究に従事。

矢野 博明(正会員)



1997年筑波大学大学院工学研究科修了。同年日本学術振興会特別研究員(PD)。99年筑波大学講師、現在、同大准教授。力覚呈示、移動感覚呈示に関する研究に従事。博士(工学)。

岩田 洋夫(正会員)



1981年 東京大学工学部機械工学科卒業、1986年 東京大学大学院工学系研究科修了(工学博士)、同年筑波大学構造工学系助手。現在筑波大学システム情報工学研究科教授。バーチャルリアリティ、特にハプティックインタフェース、ロコモーションインタフェース、没入ディスプレイの研究に従事。2004年より、デバイスアートのプロジェクトを主導。日本バーチャルリアリティ学会副会長。