

自律移動・変形する壁型ディスプレイの設計と実装

大山 貴史¹ 高嶋 和毅^{1,a)} 浅利 勇佑¹ エフド シャーリン²
ソール グリーンバーグ² 北村 喜文¹

受付日 2016年8月5日, 採録日 2016年12月1日

概要: 作業空間におけるディスプレイ形状の重要性に着目し, 作業の内容や状況に応じて自律的に移動しその配置を変更することが可能な壁型ディスプレイ (自律変形壁型ディスプレイ) について検討した結果を報告する. まず, デザインスタディにより, ユーザによる壁型ディスプレイの利用形態を調査した. その結果, 作業場面に応じてユーザは平面以外の様々なディスプレイ形状を求めることが分かり, 自律変形壁型ディスプレイの設計にあたって重要となる形状や変形方法の指針を得た. また, その指針に基づき, 様々なユーザの要求やコンテキスト (ユーザの意図, 表示コンテンツ, 周囲の状況) に応じて自動的に変形し, 快適な作業空間を提供する自律変形壁型ディスプレイおよびインタフェースのプロトタイプを実装し, その利用シナリオについて議論した.

キーワード: 3次元ユーザインタフェース, 変形ディスプレイ, ロボティックディスプレイ, ジェスチャインタフェース

Study and Design of a Shape-shifting Wall Display

TAKAFUMI OYAMA¹ KAZUKI TAKASHIMA^{1,a)} YUSUKE ASARI¹ EHUD SHARLIN²
SAUL GREENBERG² YOSHIFUMI KITAMURA¹

Received: August 5, 2016, Accepted: December 1, 2016

Abstract: This paper explores a shape-shifting wall display that can change its shape for particular dynamic contexts. Firstly, we present a design study that aims to understand user's desirable shapes of a wall display for various interaction scenarios. Our result suggests that people would prefer to use a range of screen shapes rather than a single static flat display arrangement. Based on this, we design and implement the first prototype of shape-shifting wall display which can automatically change its physical shape or screen arrangement to support the collaborative or individual contexts of people's activities. Finally, we discuss some of potential interaction scenarios with the shape-shifting wall display and interaction techniques based on user's explicit gesture commands and inferred implicit context from display content and users' spatial relations around the display.

Keywords: 3D user interface, shape-changing displays, robotic displays, gesture interface

1. はじめに

我々が日常的に様々な作業を行う空間には, PC, スクリーン, ホワイトボードなどの多くのディスプレイが存在

する. 人はこれらを介して, 情報の収集・発信・共有といった作業を, 個人, あるいは他者と共同で行う. そのため, これらディスプレイの形状や配置は, 作業における人の行動に大きな影響を与えることが知られている. たとえば他者と作業する場面において, お互いが一定の距離まで近づくと人は共有画面を求めるようになるが (F-formation [14]), その後, 共有が終わり再び個人作業に戻ると, 人はプライバシーの守られた自分だけのディスプレイを求めるようになる. 特にオフィスや研究室など, 様々な構成員からなる

¹ 東北大学電気通信研究所
Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan

² カルガリー大学コンピュータサイエンス学部
University of Calgary, 2500 University Dr. NW, Calgary, Alberta, T2N 1N4, Canada

^{a)} takashima@iec.tohoku.ac.jp

作業は流動的であり、その場で行う作業や、それに適したディスプレイ環境もつねに変化していく。

しかし、一般に利用されているディスプレイ、特に大きな壁面型ディスプレイについては、形状や位置は固定されていることが多い（例：会議用の大型モニタ）。これは、情報共有や大きなコンテンツを扱う場面で便利であるが、作業形態（1人か複数人か）や内容（共有かプライベートか）によっては、情報にアクセスしにくい、ディスプレイ前での移動が必要、プライバシーが保たれないなどといった課題も現れる。したがって、固定された配置のディスプレイでは、環境やユーザの動的なタスクの変化に対応できないだけでなく、作業を円滑に実施するためのユーザの行動を阻害してしまう恐れもある。

様々な状況に対応する作業空間をつくるために最も単純な方法は、複数の壁面型ディスプレイを組み合わせ、それらの配置を手動で変更して利用することである。キャスト付きのスタンドにマウントされた6台のプラズマテレビからなる Chained Displays などが典型的な研究例である [12]。しかし、複数人で共有できるほど大きな画面を持つディスプレイを手動で変形させることには手間がかかり、効率や負荷の面で現実的ではない。

そこで、次の可能性として考えられるのが、ディスプレイ自体に自律的に移動・変形する能力を持たせる方法である。たとえば、小さなディスプレイを組み合わせることで、コンテンツに応じた様々なデバイスの変形を実現している例がある [1], [9], [20]。また、ロボットアームを取り付けることで、映し出されるコンテンツやユーザのインタラクションに応じて、物理的に移動・回転するディスプレイもすでに開発されている [3], [21]。ただし、これらはあくまでもエンタテインメントを目的にしており、様々な作業形態に対応する作業空間の構築を目的としたものではない。これらに対し我々は、TransformTable という周囲の状況に応じて自律的に変形することができるデジタルテーブルを検討しており [23]、作業空間の形を変えることで人々の作業やインタラクションをより良いものにするを目指している。しかしながら、鉛直スクリーン（プロジェクタスクリーンや壁型ディスプレイ）やマルチディスプレイは、汎用性が高くかつ情報を共有する場面において頻繁に利用されるものであるにもかかわらず、その自律変形や移動機能は十分に検討されてこなかった。Multi-tiles ではプロジェクタスクリーンを複数枚に分割し、モータにより部分回転が可能な鉛直ディスプレイを提案しているが [9]、変形は情報の提示手法の1つであり、作業空間の再構築を目指したものではない。

そこで本稿では、作業形態に応じてその形状と配置を自動的に変更が可能な壁型ディスプレイを提案し、その利用シナリオと実用可能性について検討した結果について報告する。まず、ユーザが、どのような形状の壁型ディスプレ

イを欲しているかを確認するデザインスタディを実施した。実験では、多様なコンテンツを利用する場面において、利用者は平面のディスプレイを好むのか、そうでないならばどのようなディスプレイ形状が望まれるのか、という2つの疑問について検討した。その結果、実験参加者は与えられたそれぞれのシナリオ（表示コンテンツや空間配置）に応じて様々なディスプレイ配置を行うこと、設計された形状には、平面、分離型、凹型、凸型、L型などのパターンが存在することが分かった。我々はこの結果に基づき、自律移動・変形可能な壁型ディスプレイ（自律変形壁型ディスプレイ）のプロトタイプを設計し、実装した。このディスプレイは、部屋を構成する壁ではなく、3枚の移動可能な直立スクリーンから構成され、それぞれの配置を変更することで、ディスプレイ形状を変更することができる。ユーザはシンプルなジェスチャを用いて好みの変形を行うことができ、また、システムまたは外部センサが表示コンテンツや空間配置を認識して自律的に変形することも可能である。これにより、自律変形壁型ディスプレイは様々な動的なコンテキストに対応し、つねに最適なディスプレイ環境を提供できると期待される。

2. 関連研究

2.1 様々なディスプレイ環境

ディスプレイは単に情報を表示するだけではなく、ユーザとの、あるいはユーザ同士のインタラクションを引き起こす一種のコミュニケーションツールという側面もある。テーブル型、直立型、床型、マルチディスプレイなど、様々な形態で日常的に利用され、その操作方法も、キーボードやマウスなどの外部機器を用いたものや、タッチやジェスチャなどの身体的なものなど、利用環境に合わせて選択される。

ディスプレイ環境が作業空間に与える影響は大きく、これまで数多くの研究が行われてきた。たとえば Ardito らは、近年普及が進んでいる大型ディスプレイについて、形状やインタラクション方法など、複数の角度からの分類と考察を行っている [2]。特定のディスプレイ環境について詳細な考察を行った研究も多く、E-conic ではマルチディスプレイ環境での画面の傾きによる影響について [16]、Endert らはディスプレイ環境が湾曲することの効果について議論している [4]。

また、会議やブレインストーミングなどの実際の作業場面においては、個人での作業とグループでの作業が混在することも多い。このような作業場面は mixed-focus collaboration と呼ばれ、個人画面と共有画面が同時に求められる [7]。そのため、立ち位置に応じてユーザごとに異なったコンテンツの表示が可能であるディスプレイ [11], [13] やミドルウェア [6] が研究されてきた。

2.2 ユーザの空間行動に対応するディスプレイ

人は意識的、または無意識的にモノや他者との立ち位置を調整し、コミュニケーションや作業を円滑に進めようとする傾向がある (proxemics [8]). この概念を応用し、人数や立ち位置などの変化をセンサなどから検出し、その場で必要と推定されるコンテンツを自動的に表示するディスプレイが提案されている [15], [26], [27]. たとえばユーザがディスプレイに近づくと、システムはユーザが興味を持ったととらえ、より詳細な情報を画面に表示する. また複数人でディスプレイを利用する場合には、グループで共通の情報を自動的に表示する.

このような空間行動の概念を用いたインタフェースの開発は、近年さかんに研究されている. たとえば F-formation と呼ばれる概念は、集団の親密度を他者との距離で予測する. Marquardt らはこの F-formation に基づき集団の関係を推測し [14], タブレットを用いたクロスデバイスインタラクションに利用している. ほかに、E-conic においては、マルチディスプレイ環境における表示コンテンツの歪みを補正するために、ユーザの立ち位置や向きを利用している [16]. また空間内のあらゆる平面をディスプレイとして利用する Steerable interface においては、ユーザとディスプレイとの距離 (proxemics) やジェスチャを検出することにより、ユーザの意図や状況に応じて、いつでも最適な場所にコンテンツを表示できるシステムを提案している [18].

我々が本稿で提案する自律変形壁型ディスプレイにおいても、最適なインタフェースの実現のために、ユーザの空間的な配置や作業内容などの状況を検出している. ただしそれらを表示コンテンツだけでなく、物理的なディスプレイの配置・形状の変化のためにも利用することで、より身体的・直感的に、ユーザの行動に合ったディスプレイ環境を提供できると考えられる.

2.3 手動変形壁ディスプレイ

ディスプレイ形状を手動で変更することの意義はいくつかの研究例で主張されている. ConnecTables は車輪のついた台座の上に設置された水平ディスプレイで [25], 2 人のユーザが ConnecTable を連結させると、協同作業がしやすいように、画面上のインタフェースも結合する. また Chained Displays は、連結された 6 枚の直立のプラズマディスプレイである [12]. 著者らは、これを公共空間に置き、平面型、柱型、凹型などいくつかの配置が実際にユーザのインタラクションに影響することを確認した. ただし、これはあくまでディスプレイ形状に関する研究であり、ユーザがどのようにディスプレイを変形させるのかということについては述べられていない.

これらの研究はディスプレイの変形の有用性を論じているが、本研究ではさらにそれを発展させ、ディスプレイの自律的な移動と変形による作業空間の再構成を検討している.

2.4 ロボティックディスプレイ

自動で変形可能なディスプレイの研究はいくつか行われてきた [1], [9], [20]. たとえば Tilt displays では、コンテンツの内容を物理的に表現するための方法として、9 枚の小型ディスプレイからなる変形ディスプレイを用いている [1]. また Multi-tiles では、同時に複数のコンテンツを別方向に提示するために、部分回転可能な鉛直ディスプレイを提案している [9]. ただしこれらは情報の提示手法の 1 つであり、コンテンツの立体的な表示やプレゼンテーションなど、特定の利用法についてのみ検討されている. 我々が検討している TransformTable は、周囲の状況やコンテンツに応じてそのテーブル面の形状が変化するデジタルテーブルであるが [23], このような作業空間に直接的に影響を与える大型の変形ディスプレイは、ほとんど検討されていないのが現状である.

変形だけでなく、移動が可能なロボティックディスプレイの研究も行われている. 遠隔地どうしのコミュニケーションロボットとして用いられることが多いが [5], 近年我々は自律移動が可能な複数のデジタルテーブル MovementTable を開発し、動的な作業空間のデザインについて検討している [24]. また、より自由度の高い動きが可能なエンタテインメント向けのロボティックディスプレイも開発されている [3], [21]. 産業用ロボットアームを利用したこれらの動きは美しく洗練されたものであるが、アートを意図したものであり、作業空間の再構成に適しているかどうかは明らかではない.

3. デザインスタディ

我々はまず、デザインスタディを実施し、壁型ディスプレイの利用形態を調査することから始めた. これは、ユーザによる壁型ディスプレイの利用を観察し理解することで、変形壁型ディスプレイを設計するにあたって基本的な次の 2 つの疑問について検討するためである.

- 様々なコンテンツを利用する場面において、利用者はつねに平面的なディスプレイを好むのか.
- そうでないならば、どのような形状がどのような場面に適しているのか.

もし、1 つ目の疑問において平面以外の形状が好まれるとすれば、作業場面により異なったディスプレイ形状が必要であることが明確になり、変形壁型ディスプレイの意義が高まる. また、2 つ目の疑問について詳細に検討し、場面ごとに適切な形状を明らかにできれば、センサなどを用いて場面を検出したのちに自律的に壁型ディスプレイを変形させる応用可能性も出てくる.

3.1 実験方法

デザインスタディの参加者は提案システムの知識を持たない 16 人の大学生 (男性 11 人, 女性 5 人, 平均年齢 22.9



図 1 利用した 6 つのコンテンツ

Fig. 1 Screen content conditions.

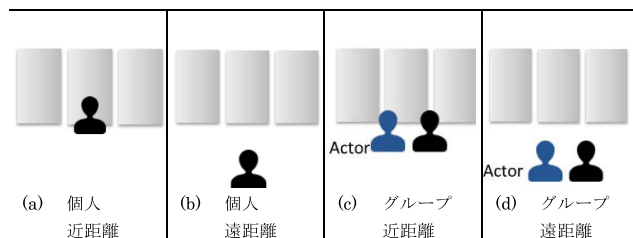


図 2 想定した 4 つの空間配置

Fig. 2 Spatial conditions.

歳)で、1人ずつ行われた。参加者の前には、ディスプレイとして利用することを想定した車輪付きの直立スクリーン (150 × 80 cm) が 3 枚置かれ、それらは簡単に手で、個別に位置や向きを変えることができる。参加者は、それぞれの試行の冒頭で利用場面 (以降、シナリオと呼ぶ) についての説明を受け、そのシナリオに対して適切だと感じるディスプレイ形状を、スクリーンを自由に動かしてデザインすることを求められた。

シナリオは事前に実験者が用意したもので、全部で 24 通りあり、それらは 6 つのコンテンツと 4 つの空間配置からなる (24 試行 = 6 × 4)。図 1 には、今回用いたコンテンツを示している。壁面ディスプレイに限らず、直立型ディスプレイでの利用が想定される典型的な 6 つを選んだ。またこのコンテンツそれぞれに対し、どれくらいの距離から何人で利用するのか、図 2 に示した 4 つの空間配置を想定した。(a) と (b) は個人作業、(c) と (d) はグループワークを想定しており、加えてそれぞれに、近く・遠くというディスプレイとの距離を設定した。ただし、ここでは具体的な数値は設定しておらず、近く・遠くの判断は参加者の主観的な尺度に委ねた。

実際にこのような壁型ディスプレイを利用する際は、ほかにも多くの要因があることは確かである。たとえば、ディスプレイを立てて利用するのか座って利用するのか、入力

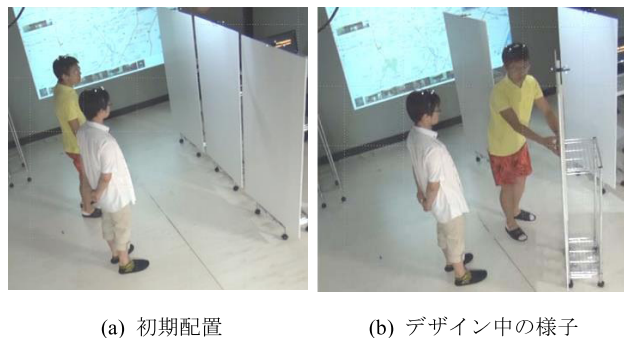


図 3 デザインスタディの様子 (奥：実験参加者、手前：実験者)

Fig. 3 Design study.

デバイスは何を用いるのか、グループの親しさはどの程度かなどによって、利用形態や求めるディスプレイ形状は異なるはずである。これらの要因をシナリオに含めることは可能であったが、今回は実験手続きをシンプルにするため、作業内容と空間配置という、作業空間において基本的かつ重要な 2 つの観点に絞って考えることとした。細かな状況設定は、実験参加者に自由に想像させ、その内容は各試行後に回答してもらった。

スクリーンの高さを 150 cm としたのは、ラックを含めた高さが日本人の平均身長である 160 cm 前後になるよう検討した結果である。また幅は、オフィスなどで日常的に利用されているパーティションのサイズや、デザインスタディの際の参加者の操作のしやすさを考慮し 80 cm と決定した。構成を 3 枚としたのは、3 枚で基本的かつ重要な形状がデザインできると考えたためである。2 枚では設計できる形状に限りがあり、4 枚ではディスプレイが大きくなりすぎ、かつ結果が複雑になってしまうと考えた。

実際の実験の様子の一部を図 3 に示す。まず初めに、参加者 (図 3(a) 奥側) にはシナリオに応じたコンテンツが奥の大型スクリーンに提示される。ここで、実際に利用を想定している 3 枚のスクリーンに直接コンテンツを提示しなかったのは、参加者に対してプロジェクションによる利用だという固定観念を植え付けないためと、特定のコンテンツの細部 (フォントなど含む) に特化したデザインを防ぐためである。実験参加者の創造性に基づくデザインの観察にも興味があった。次に実験者から、コンテンツに関する補足説明と、空間配置に関する条件が指示される。図 2(c), (d) のようなグループワークを想定したシナリオの場合、協同作業員として演者 (図 3(a) 手前側) が配置される。このとき演者は無言で何も行動しないが、参加者はこの演者とともに作業している場面を想像し、ディスプレイの形状をデザインすることを求められる。1 つのシナリオにつき制限時間は 2 分間で、参加者はその間自由に、ただしスクリーン 3 枚すべてを用いてディスプレイ形状をデザインする。このとき、初期配置の平面のままでもかまわないことも指示されている。この間、ビデオカメラ

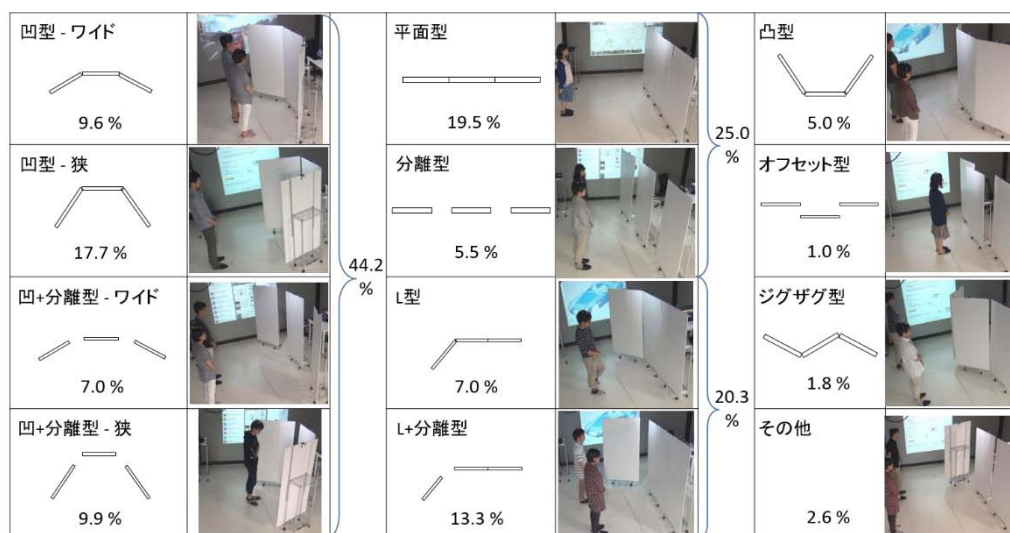


図 4 得られたディスプレイ形状

Fig. 4 Designed screen shapes.

(SONY HDR-CX630) と赤外線センサ (OptiTrack Flex3) によって、スクリーンと参加者、演者の位置と方向を記録した (図 3(b)). デザインが終わると、参加者は形状についての理由を説明し、その情報は実験者が IC レコーダを用いて記録した。

以上の手順を、24 すべてのシナリオについて行った。次のシナリオへと移る際は、実験者が必ずスクリーンの並びを平面に戻した。また、シナリオを提示する順番は、カウンターバランスを考慮して参加者ごとに変えている。

3.2 実験結果と考察

得られたディスプレイ形状

デザインスタディにより、合わせて 384 (24 シナリオ × 16 人) の様々なディスプレイ形状が得られた。まず我々はこれらを、配置や角度など、ディスプレイ形状の特徴ごとに分類した。分類にはスタディの様子を録画したビデオ、赤外線センサによって得られた座標データを用い、参加者のデザインについてのコメントも考慮に入れた。

分類の結果を図 4 に示す。ここから読み取れるように、実験参加者が設計したディスプレイの形状は多岐にわたるものの、いくつかの主要パターンが存在した。最も多かったのは両端が手前に傾いた凹型で、全体の約 44% を占めている。角度にはばらつきがあったが、角度の大小に応じて異なった目的が設定されていることがインタビューの結果から推測されたため、45 度より小さいものはワイド型、より大きいものは狭型と分類した。また、各スクリーンが 10 cm 以上離れたものは分離型として分類した。凹型の次に多かったのは、平面型で約 25%、続いて L 型で約 20% であり、これらについても同様の基準で分離型を分類した。ほかにも、凸型やジグザグ型など、特徴的な形状が見られた。

これらの結果より、冒頭で設定した 2 つの疑問について

考察する。まず、どのような状況でもつねに平面が好まれるのか、という疑問についてだが、今回の結果においては、一般的な平面ディスプレイ配置が行われた試行は全体の約 20% しか占めておらず、平面以外の形状が積極的に選ばれていた。そのため、状況に応じてディスプレイが変形することの有用性は大きいと考えられる。

一方で、ある特定のシナリオで求められる形状については、シナリオと形状との関係についてより詳細に分析する必要があるため、我々は次の段階として、シナリオごとの分類を行い、シナリオと形状の関係について考察した。

シナリオとディスプレイ形状

表 1 はシナリオごとに、最も選ばれた形状とその割合を示したものである。比較のため、一般的な平面が選ばれた割合も示してある。この表と参加者のコメントをもとに、以下でコンテンツごとの考察を行う。

◆大判地図

地図のような大きなアプリケーションを扱う場合、L 型が選ばれることが最も多かった。参加者のコメントによると、彼らの多くは 2 枚に地図を表示し、もう 1 枚で別な画面 (ストリートビューや乗り換え情報など) を扱うことを考えていた。理由としては、実際に画面を操作する場合、3 枚だと操作範囲が広すぎる、かつ視界に入らなくなるという意見が大半であった。また、個人とグループでは結果に大きな違いはなかったが、ディスプレイとの距離が遠くなった場合、平面が選ばれる割合が高くなった。これも視界の影響だと考えられる。

◆プライベート (クレジットカード情報)

このコンテンツではクレジットカード番号の入力を行う場面が想定されていた。表 1 に示すように、ディスプレイとの距離によらず、個人作業の場合には凹型が多い。これは周囲の目からプライバシーを守るためであり、左右の壁は

表 1 シナリオごとのディスプレイ形状
Table 1 Shape categorizations per scenario.

	個人・近距離		個人・遠距離		グループ・近距離		グループ・遠距離	
	トップ1	平面	トップ1	平面	トップ1	平面	トップ1	平面
大判地図	 31.25%	 6.25%	 56.25%	 31.25%	 56.25%	 12.5%	 31.25%	 37.5%
プライベート	 50%	 0%	 37.5%	 12.5%	 25%	 6.25%	 25%	 12.5%
ビデオゲーム	 50%	 6.25%	 25%	 25%	 50%	 6.25%	 50%	 12.5%
複数ウィンドウ	 62.5%	 0%	 25%	 6.25%	 31.25%	 6.25%	 50%	 0%
16:9映画	 43.75%	 31.25%	 18.75%	 68.75%	 37.5%	 18.75%		 62.5%
3Dモデリング	 31.25%	 12.5%	 18.75%	 43.75%	 25%	 18.75%	 18.75%	 31.25%

物理的なシールドとして用いるという意見が多かった。一方グループの場合は、特定の形状が多く選ばれるということはなく、ジグザグ型や1枚だけ別方向を向いた形状など特徴的な形がデザインされた。これは、グループ作業中にプライベートな画面を表示するという場面は日常生活では少ないが、その中で協同作業者の目を遮りプライバシーを守るための、参加者の様々な工夫だと考えられる。

◆ビデオゲーム

ほとんどの参加者は今回設定したシミュレータゲームに没入感や臨場感を求めており、ゲームセンタやデュアルディスプレイのイメージから凹型が最も多いという結果になった。またディスプレイの角度は利用する距離と関係があり、大判地図と同様に、離れるとより平面に近づく傾向が見られた。

◆複数ウィンドウ

どの状況においても、凹型かつ分離した形状が選ばれることが多かった。この理由としては、物理的なギャップによって作業の分離がより明確になり使いやすいという意見がほとんどで、凹型であることよりも分離されていることの方が重要であった。

また数は多くなかったが、グループ・近距離条件においては、凸型のディスプレイ形状がデザインされた。これは空間を分断し、グループにおいても個人スペースを確保するための工夫である。左右の画面で個人作業を、中央の画面で情報を共有するという意見が見られた。

◆16:9映画

ゲームと同様、参加者は映画に臨場感を求めており、凹型が好まれやすい傾向となった。だが視界の問題や、映画

はオリジナルのまま平面で観るべきだという意見も多く、ディスプレイから離れた場面では、平面が選ばれることが最も多かった。表1のグループ・遠距離条件において空欄があるのは、平面以外の意見が極端に少なかったためである。

◆3Dモデリング

立体的な情報は平面で広く扱いたいという意見と、ディスプレイを傾けた方が見やすいという意見に二分される結果となった。他のコンテンツのように、ある特定の形状が選ばれやすいということではなかった。

以上がコンテンツごとの考察である。同じコンテンツでも空間配置が異なれば、選ばれるディスプレイ形状も異なっていた。全体を通じて以下の考察を得た。

- ディスプレイとの距離が近い場合、見やすさや臨場感を求めて、凹型を選ぶ傾向にある。
 - ディスプレイとの距離が遠い場合、より平面的な形状を選ぶ傾向にある。
 - 協同作業者がいる場合、互いに見やすい形状が必要であり、場面によっては個人画面が求められる傾向にある。
 - 複数の画面で作業をしている場合、1枚だけ傾けたり(L型)、分離させたりと、物理的な形状変化と対応させる傾向にある。
 - 凸型、オフセット型、ジグザグ型は数こそ少なかったものの、コンテンツによらず登場していた。
- ということである。

4. 自律変形壁型ディスプレイの実装

デザインスタディにより、人は状況に応じて、平面以外の様々なディスプレイ形状を求めることが確かめられた。しかし、既存の壁型ディスプレイや、ディスプレイマウントに設置された大型ディスプレイなどは大きく、広い表示領域を持つため、複数人で情報を共有しやすいなどの様々なメリットがあるものの、その大きさゆえに通常は手でその形状を変化させたり移動させたりすることは難しい。そこで我々は、デザインスタディによって得た知見に基づき、自動的に変形することが可能な壁型ディスプレイを提案し、プロトタイプを実装した。なお、変形を制御するためのインタフェースとしては、ユーザによる能動的なコマンドとしてのジェスチャと、表示コンテンツ内容やディスプレイ周りのユーザの空間配置による自律的なアルゴリズムによるものの2種類を検討した。前者は、ユーザ主体で自由に制御することができるコントローラとしてのインタフェースであり、後者は、システムが主体となって、検出可能なコンテキストに応じてつねに最適なディスプレイ環境を提供するシステムになる。

2種類のインタフェースを検討したのは、デザインスタディの際に実施したインタビューにおいて、両者の可能性に言及する参加者が多かったためである。両者を同時に使うことも可能であるが、本研究ではそれぞれ分けてその可能性を述べる。

4.1 デザインと実装

自律変形壁型ディスプレイ（図5）は3枚の直立スクリーン（150×61 cm）から構成されている。スクリーン幅はプロジェクタの投影範囲と、Roombaに搭載する際の荷重バランスを考慮して、デザインスタディで利用したものより若干狭いものとした。構成を3枚としたのはデザインスタディと同様、3枚で基本的かつ重要な形状がデザインできると考えたためである。それぞれのスクリーンは家庭用掃除ロボットであるRoombaの上に固定されており、独立して移動可能である。また、スクリーン上部には赤外線マーカが取り付けられており、赤外線センサ（OptiTrack Flex3）で正確な位置と角度を測定、外部計算機によるプログラムを用いて動きを制御している。さらに、上部に設置されたKinect センサにより、（後述する）ユーザのジェスチャを用いた制御も可能である。外部計算機とRoombaの無線通信部にはBluetoothが、Kinectとの通信部にはTCPが用いられている。

コンテンツの表示にはプロジェクタによる投影を用いているが、ディスプレイ形状の変化にともない歪みが生じるため、射影変換による補正を行っている。このプログラムも外部計算機により制御され、マーカの位置・姿勢から動的な補正が可能である。実装はopenFrameworksで行われた[17]。



図5 プロトタイプ

Fig. 5 Prototype implementation.

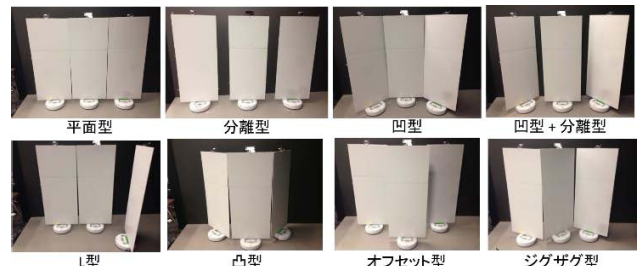


図6 基本形状

Fig. 6 Basic shapes.

ユーザは画面上のコンテンツを、ワイヤレスマウスやスマートフォンで操作することができる。

4.2 基本形状

提案する変形壁型ディスプレイでは、各スクリーンを独立に動かすこともできるが、デザインスタディから得られた知見をもとに、我々は8種の重要なディスプレイ形状を基本形状として登録した（図6）。システムは簡単にこれらの形状に変形できるようになっている。

5. インタラクション方法と利用シナリオ

人の作業は多様かつ流動的に変化していくため、ディスプレイの変形方法についても、意図的に変形させたい、作業場面ごとに使い分けたいなど、様々な要求が生じると考えられる。そこで我々は、壁ディスプレイが変形する方法として、ユーザの指示による明示的な方法と、場面に応じた暗示的な方法の2つを実装した。以下では、それぞれの方法とその利用シナリオが持つ可能性について検討する。

5.1 ジェスチャによる明示的なインタラクション

ここでいう明示的な方法とは、ユーザが意図的にディスプレイの変形を行う方法である。これにはマウスやスマートフォンなどの入力を用いることも可能だが、我々はジェスチャを用いた実装を行った。ジェスチャの場合、ディスプレイに触れる必要も他のデバイスを用いる必要もなく、直接ディスプレイの位置や角度を変形できるかのようなインタラクションが可能である。また周囲の作業にも、形状変化の意図が明確に伝わる。

図7に、ジェスチャによる操作の例を示した。我々はす

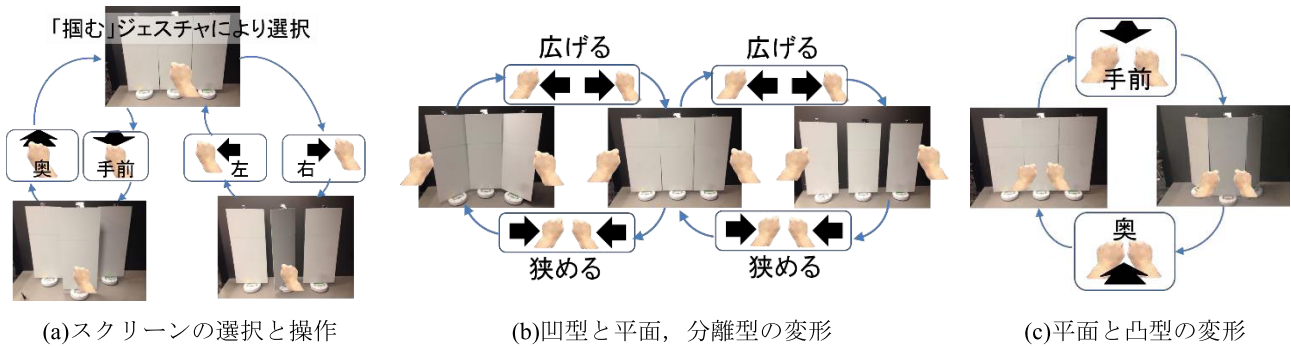


図 7 ジェスチャによるインタラクション

Fig. 7 State transition model of gesture-based shape control.

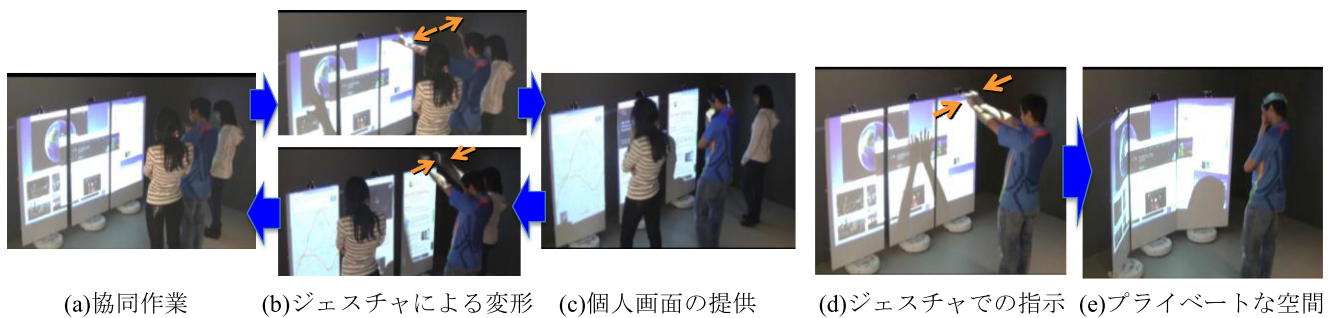


図 8 ジェスチャによる利用シナリオ

Fig. 8 Explicit shape controls via gestures in individual and collaborative activities.

すべての操作に、「つかむ—動かす—離す」という実際に壁を動かす際の動作を、実世界のメタファとして統一して用い、自然なインタラクション方法の設計を心がけた。手の動きは、スクリーンの上方に設置した Kinect により検出した。より直感的な操作のため、ジェスチャは両手を広げる、狭める、押す、引くなど単純なものとし、変形の結果もジェスチャに呼応するものとした。

たとえば図 7(a) では、ユーザは片手をつかむことで 1 枚のスクリーンを選択し、前後の動作で位置を、左右の動作で角度を変更している。同様のジェスチャを両手で行うことにより、ユーザは 3 枚すべてを同時に扱うこともできる。また、図 6 に示した基本形状の切替えも、ジェスチャにより可能である。図 7(b) では、凹型・平面型・分離型の切替えを、両手を広げる、狭めるジェスチャで行っている。同様に (c) では、平面型・凸型の切替えを、両手を押す、引くというジェスチャで行っている。

次に図 8 には、実際に想定される利用シナリオの例を示した。ここでは 3 人のユーザが 1 枚の大きな平面ディスプレイを用いて協同作業を行っている (図 8(a))。もし、協同作業中に個人作業に移りたいと感じた場合、同図 (b) 上のように手を広げるジェスチャを行えば、平面から分離型へと変形し、個人のディスプレイが提供される (同図 (c))。逆に同図 (b) 下のように手を狭めるジェスチャを行えば、分離型から平面へと戻り、協同作業がすぐに再開できる。同図 (d), (e) は平面型で個人作業を行っている場面で、も

し没入感のある、またはプライベートな空間が欲しいと感じた場合、手を狭めるジェスチャを行えば、すぐに凹型に変形することができる。

5.2 暗示的なインタラクション

暗示的な方法とは、システムが自律的に状況に応じたディスプレイ形状を選択し、変形する方法である。デザインスタディより、人は様々なディスプレイ形状を求めることが確かめられた。指示がなくても、システムが自動的にこれらの形状に変化することで、ユーザにとってより自然でストレスなく、いつでも快適な作業空間が実現できる可能性がある。そこで我々は、デザインスタディと同様に、表示コンテンツと周辺の空間配置、という 2 つを変形のトリガとして用いた。

コンテンツに応じたディスプレイの変形

我々が実装したシステムは、表示しているアプリケーションやファイル形式を認識できるため、コンテンツに適したディスプレイ形状に自動で変形することができる。

図 9 にその一例を示す。たとえばパスワードの入力画面のようなプライベートな画面が表示された場合、周囲の目を遮るように凹型の形状に変形する (図 9(a))。映画のような 16:9 のワイド画面が表示された場合、平面かつギャップの少ないディスプレイが必要だとシステムが判断し変形する (図 9(b))。三面図のような情報が表示された場合は、凸型に変形する。こうすることで奥行きが感じら

れ、より立体的な確認が可能となる (図 9(c)). フライトシミュレータやゲームなど、没入感や臨場感が必要な場合、凹型ディスプレイへと変形する (図 9(d)).

現状では、表示アプリケーションと形状の関係はユーザの設定によるが、システム上、アプリケーションの種類を検出することは難しくなく自動化は現実的なものである。
空間配置に応じたディスプレイの変形

デザインスタディでは、コンテンツの違いだけでなく、人の空間配置によっても選ばれるディスプレイ形状が異なることを示した。そこでデザインスタディの結果と Proxemics interaction の考えに基づき [15], 周囲の空間配置を認識し変形するシステムを実装した。ユーザとスクリーンの位置・姿勢は上部に取り付けた赤外線マーカーによりリアルタイムに取得できる。

まず我々は、アンビエント・ゾーンとインタラクション・ゾーンという 2つの領域を設けた (図 11)。これはデザイ

ンスタディにおける近距離条件と遠距離条件に対応している。デザインスタディにおいて実験参加者に自由に設定させた近距離条件の平均はディスプレイから約 1.2m の位置であったため、この位置を 2つのゾーンの境界とした。アンビエント・ゾーンにユーザがいる場合、ディスプレイは遠くから眺めるように利用されることが想定されるため、形状は一般的な平面のままである。インタラクション・ゾーンに 2人以上いる場面では、F-formation と呼ばれるお互いの距離関係 [14], [15] やデザインスタディの結果から最適なディスプレイ形状を予想し変形する。

図 10 に、実際の場面を想定した利用シナリオの例を示す。まずインタラクション・ゾーンにだれもいない場合、通り過ぎる人々からも見やすいように、ディスプレイは平面となっている (図 11)。ここで、中央のスクリーンへとユーザが近づきインタラクション・ゾーンに入ると (図 10(a)), 凹型が個人作業には適しているとシステムが判断し、変形する (図 10(b))。これは表 1 において、個人作業時には凹型が好まれるという結果に基づいている。

次に図 10(c), (f) は、協同作業を行いながらも個人画面が必要となる状況の利用シナリオである。これは mixed-focus collaboration と呼ばれ [7], 計画を立てる場面や、ゲーム、議論を行う場面などが相当する。たとえば、個人作業中にもう 1人のユーザがインタラクション・ゾーンに入ると (図 10(c)), 1枚のスクリーンが平面になり、共有画面を提供する (図 10(d))。2人がより近づいたり位置を変えたりすると、もう 1枚のスクリーンも平面になり、協同作業を支援する (図 10(e))。ここでお互いが両端に離れる動きを見せると、ディスプレイは凸型に変形する。これは協同作業が終わり、個人作業へ移るのだとシステムが判断したからで、左右のスクリーンはそれぞれの個人画面、中央は共有画面として機能する (図 10(f))。図中では 2人は旅行の計画を立てており、それぞれの画面ではメールやカレ

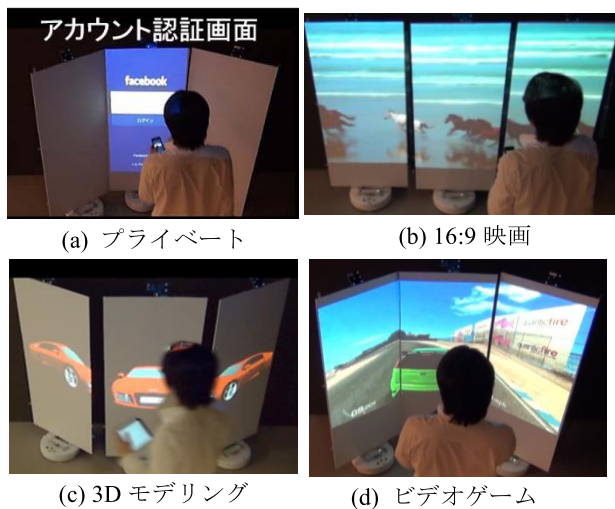


図 9 コンテンツに応じたディスプレイの変形

Fig. 9 Implicit shape control inferred from screen content.

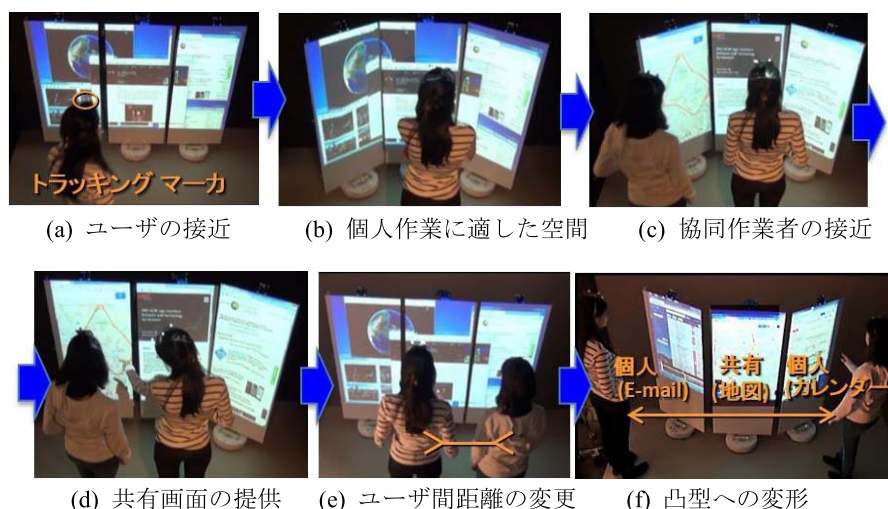


図 10 空間配置によるインタラクションシナリオ

Fig. 10 Implicit shape control inferred from spatial relationships.



図 11 インタラクション領域

Fig. 11 Proxemics zones.



図 12 エラー処理

Fig. 12 Stop gesture.

ンダなどのプライベートな情報を扱いつつ、中央では旅行先の地図や観光情報などを共有している。個人作業が終わり、再び協同作業へと戻る場合も、お互いが近づくだけでディスプレイが平面へと戻る（図 10(e)）。

このような mixed-focus collaboration, F-formation の考え方は 3 人以上でも有用である。たとえば図 8 ではジェスチャを用いて明示的に変形を指示しているが、3 人がお互いに離れる、といった振舞いをするすることで、ディスプレイの分離を促すことができる。

コンテンツと空間配置の組合せによる変形

表示コンテンツの認識と空間配置の認識を組み合わせることで、より細かな場面にも対応が可能となる。たとえばディスプレイにゲームが表示されている場合、没入感を求めて凹型に変形するのが良いと考えられるが、ここでユーザの人数や配置も認識できれば、両端のスクリーン角度を最適に設定することなどが可能となる。

エラー処理

システムの誤認識が生じた場合、ユーザの望まない変形をするどころか、危険な動きをする可能性もある。これを防ぐにはいくつか方法があるが [10]、最も単純な方法に変形に制約を設けることである。たとえば、基本形状以外の変形を行う場合はユーザに確認を求めるとことや、素早いユーザの動きにトラッキングが敏感に反応しないよう閾値を設定するということが考えられる。

望まない動作が生じた場合に備え、我々はシステムの停止ジェスチャを実装した。センサに右手の掌を向けることで、変形を停止することができる（図 12）。

6. 議論

本研究の主要な成果と限界

ディスプレイ形状が変化し、ある特定の個人作業や協同

作業を支援する、という考えは一般的でなく挑戦的であるために、懐疑的な意見も多いかもしれない。だが我々が行ったデザインスタディの結果から、人々は状況・作業に合ったディスプレイ形状を求めることは明らかである。我々の実装した自律変形壁型ディスプレイのプロトタイプは、壁型ディスプレイをユーザが簡単に、状況に応じて変形できる 1 つの方法として有用と考えられる。

しかし一方で、これは萌芽的な研究である。我々はデザインスタディの結果をもとにしてプロトタイプの実装を行ったが、実際のユーザによる利用テストまで行っていない。また、インタラクションとして、ジェスチャ、コンテンツ、空間配置という 3 つを実装したが、これらを含めたシステムがどれだけ作業空間を良くするのか、分かっていない。ジェスチャの操作性や、コンテンツと空間配置の認識による自律変形がどれほど自然で、作業内容に影響をもたらすか、といった検証なども必要である。

多様なディスプレイ形状

前述のとおり、システム全体のユーザによる実験的検証は必須であるが、形状の変化がもたらす影響については実験を行わなくてもある程度推察できる。それはすでに日常生活において様々なディスプレイに関する慣習が存在し、また多くの研究でも検討されているためである。我々の設計やデザインスタディの結果も多分に日常的な慣習の影響を受けていることが分かる。たとえば広い凹型のディスプレイは、フライトシミュレータやゲームセンタなど、没入感が重要な場面ですでに利用されている。凸型は、箱型のディスプレイとして、物体の側面を見るために提案されている [19]。また、一部のサイネージなどでは見られる構造である。Reconfigurable Displays においては、箱型のディスプレイを組み合わせることで、直立型、L 型、テーブル型など、様々な形状を実現し論じている [22]。また研究に限らなくても、街角には、広告のためのデジタルサイネージや、店舗案内のための操作盤など多様なディスプレイが存在している。このように、ディスプレイ形状はすでに多様なものが用いられており、今後も様々な場面で展開していくと考えられる。提案する自律変形壁型ディスプレイはこれらを統合し、状況に応じて適切な形状に変形させ利用する、という新たな段階に推し進めるものでもある。

システムの設計要素

ユーザによるプロトタイプの実験と並行して我々が今後取り組むべき課題は、システムの設計の改良である。現状はスクリーンを 3 枚用いているが、これは、3 枚で基本的かつ重要な形状がデザインできると考えたためである。だが、ユーザの人数が増えた場合、3 枚では小さい場合も当然ある。またスクリーンの枚数が増えれば、デザインできる形状の幅が広がる。実際、デザインスタディの参加者の中には、4 枚での可能性に言及する者もいた。4 枚であれば、柱型や、ユーザの周囲を囲う形状もデザイン可能であ

る。また同様に、スクリーンサイズもディスプレイ形状を考えるうえで重要な要素である。我々のデザインスタディの結果（図 4、表 1）はあくまでも 150×80 cm というスクリーンサイズの設定に基づく結果であるため、このサイズが変われば異なった結果が得られる可能性が高い。たとえば、被験者は、視野、立ち位置、スクリーンまでの距離といった身体的・空間的な条件をもとに変形を実施することも多かった。このような身体的な要素が絡む場面では、おそらくスクリーンサイズの設定によって、スクリーンの変形形状だけではなく、その変形方針なども変わってくると考えられる。一方で、コンテンツや想定するインタラクション、つまりスクリーンが提供する機能をイメージして、変形を考える被験者やシナリオも多かった。たとえば、スクリーンの分離は、その物理的なギャップを生み出すことがコンテンツの閲覧やコラボレーションにとって重要であり、これは、人の身体的特徴とは直接は関連しない。このように、スクリーンとその変形が提供する機能の意義が十分に認められる場合には、スクリーンサイズの影響は小さくなく、同様の結果が得られるものと予想する。

次に検討すべきは、変形の動きである。我々のデザインスタディでは形状に焦点を当てており、自動変形そのものについては論じていなかった。しかしディスプレイの変形はいったん作業を中断するため、移動速度や変形のタイミングなどを十分考慮し、設計する必要がある。またプロトタイプでは Roomba を用いていたが、二輪駆動であるため左右に動けないなど、動きの制約がある。駆動ロボットの自由度はそのままスクリーン変形の自由度となるため、全方位のロボットなど、他の可能性も検討する必要がある。

ディスプレイの表示方法と、それにともなったコンテンツの操作方法も、ユーザに影響を与える重要な要素である。表示方法について現状ではプロジェクタ 1 台を用いて投影を行っているが、この場合ユーザ自身の影がスクリーン上に生じてしまい、またスクリーンの配置によっては表面への投影が難しいなどの問題がある。そのため複数台のプロジェクタを用いるなどして、この問題を克服する必要がある。操作方法に関しては、現状リモートタッチパッドなどの間接指示環境を想定しているが、より直接的なタッチでの操作も十分に考えられる。理想的にはデジタルタッチディスプレイそのものを移動させればよいが、重量や圧迫感など、その実装に向けた検討事項は多い。

7. まとめ

本稿では、自律移動・変形が可能な壁型ディスプレイの提案と検討を行った。まず我々は 6 つのコンテンツと 4 つの空間配置からなる 24 のシナリオを作成し、ユーザに対してデザインスタディを行った。その結果、シナリオに応じて、ユーザは平面以外の様々なディスプレイ形状を求めること、また選ばれた形状には、平面、分離型、凹型、凸型、

L 型などいくつかの基本パターンが存在することを確認した。次に我々は、デザインスタディで得られたコンテンツと形状についての知見をもとに、3 枚の直立スクリーンからなる自律変形壁型ディスプレイのプロトタイプを実装した。これは小型ロボットにより制御され、スクリーンごと独立した変形が可能である。変形の方法としては、ジェスチャによりユーザが明示的に指示する方法と、表示コンテンツや空間配置によりディスプレイが自律的に変形する方法を実装した。また、それぞれについて利用シナリオを想定し、作業空間にどのような影響がもたらされるのかを示した。今後は、ユーザによるプロトタイプの有用性の検証を行うとともに、設計要素のさらなる検討を通して自律変形壁型ディスプレイの可能性を追求していく予定である。

謝辞 本研究の一部は、科研費 (26730101)、東北大学電気通信研究所共同プロジェクト、若手リーダー研究者海外派遣プログラム、Frank and Sarah Meyer Foundation CMG Collaboration Centre, and NSERC's Discovery Grants による。

参考文献

- [1] Alexander, J., Lucero, A. and Subramanian, S.: Tilt displays: Designing display surfaces with multi-axis tilting and actuation, *MobileHCI '12*, pp.161–170 (2012).
- [2] Ardito, C., Buono, P., Costabile, M. and Desolda, G.: Interaction with Large Displays: A Survey, *ACM Comput. Surv.*, Vol.47, No.3, Article 46, p.38 (2015).
- [3] Box by Bot & Dolly, available from (<https://www.youtube.com/watch?v=IX6JcybgDFo>).
- [4] Endert, A., Bradel, L., Zeitz, J., Andrews, C. and North, C.: Designing large high-resolution display workspaces, *AVI '12*, pp.58–65 (2012).
- [5] Double Robotics, available from (<http://www.doublerobotics.com/>).
- [6] Gjerlufsen, T., Klokmoose, C., Eagan, J., Pillias, C. and Beaudouin-Lafon, M.: Shared substance: Developing flexible multi-surface applications, *CHI '11*, pp.3383–3392 (2011).
- [7] Gutwin, C. and Greenberg, S.: A descriptive framework of workspace awareness for real-time groupware, *Journal of Computer Supported Cooperative Work*, Vol.11, No.3-4, pp.411–446 (2002).
- [8] Hall, E.: *The hidden dimension*, Doubleday (1966).
- [9] Isoyama, N., Terada, T. and Tsukamoto, M.: Multi-tiles: A system for information presentation using divided rotatable screens, *MoMM '15*, pp.14–18 (2015).
- [10] Ju, W., Lee, B.A. and Klemmer, S.R.: Range: Exploring implicit interaction through electronic whiteboard design, *CSCW '08*, pp.17–26 (2008).
- [11] Karnik, A., Plasencia, D., Mayol-Cuevas, W. and Subramanian, S.: PiVOT: Personalized view-overlays for tabletops, *UIST '12*, pp.271–280 (2012).
- [12] Koppel, M., Bailly, G., Müller, J. and Walter, R.: Chained displays: Configurations of public displays can be used to influence actor-, audience-, and passer-by behavior, *CHI '12*, pp.317–326 (2012).
- [13] Lissermann, R., Huber, J., Schmitz, M., Steimle, J. and Mühlhäuser, M.: Permulin: Mixed-focus collaboration

- on multi-view tabletops, *CHI '14*, pp.3191–3200 (2014).
- [14] Marquardt, N., Hinckley, K. and Greenberg, S.: Cross-device interaction via micro-mobility and f-formations, *UIST '12*, pp.13–22 (2012).
 - [15] Marquardt, N. and Greenberg, S.: *Proxemic interactions: From theory to practice, series: Synthesis Lectures on Human-Centered Informatics*, Morgan & Claypool Publishers (2015).
 - [16] Nacenta, M., Sakurai, S., Yamaguchi, T., Miki, Y., Itoh, Y., Kitamura, Y., Subramanian, S. and Gutwin, C.: E-conic: A perspective-aware interface for multi-display environments, *UIST '07*, pp.279–288 (2007).
 - [17] openFrameworks, available from (<http://openframeworks.cc/>).
 - [18] Pingali, G., Pinhanez, C., Levas, A., Kjeldsen, R., Podlaseck, M., Chen, N. and Sukaviriya, N.: Steerable Interfaces for Pervasive Computing Spaces, *IEEE Conf. Pervasive Computing and Communications*, pp.23–26 (2003).
 - [19] Pla, P. and Maes, P.: Display blocks: A set of cubic displays for tangible, multi-perspective data exploration, *TEI '13*, pp.307–314 (2013).
 - [20] Rasmussen, M., Pedersen, E., Petersen, M. and Hornbæk, K.: Shape-changing interfaces: A review of the design space and open research questions, *CHI '12*, pp.735–744 (2012).
 - [21] Roboscreen, available from (<http://roboticarts.com/>).
 - [22] Schmidt, R., Penner, E. and Carpendale, S.: Reconfigurable Displays, *UBICOMP'04 Workshop: Ubiquitous Display Environments* (2004).
 - [23] Takashima, K., Aida, N., Yokoyama, H. and Kitamura, Y.: TransformTable: A self-actuated shape-changing digital table, *ITS '13*, pp.179–188 (2013).
 - [24] Takashima, K., Asari, Y., Yokoyama, H., Sharlin, E. and Kitamura, Y.: MovemenTable: The design of moving interactive tabletops, *INTERACT2015*, LNCS 9298, pp.296–314 (2015).
 - [25] Tandler, P., Prante, P., Müller-Tomfelde, C., Streitz, N. and Steinmetz, R.: ConnecTables: Dynamic coupling of displays for flexible creation of shared workspaces, *UIST '01*, pp.11–20 (2001).
 - [26] Vogel, D. and Balakrishnan, R.: Interactive public ambient displays: Transitioning from implicit to explicit, public to personal, interaction with multiple users, *UIST '04*, pp.137–146 (2004).
 - [27] 渡邊恵太, 安村通見: 日常生活における人間の行為に着目したインタラクションの提案と試作, 情報処理学会研究報告書, 2005-HI-115, pp.69–74 (Sep. 2005).



大山貴史

2017 年 3 月東北大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻博士課程(前期 2 年)修了。2017 年 4 月株式会社博報堂アイ・スタジオ入社。



高嶋 和毅

2006 年大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻博士前期課程修了。2008 年同専攻博士後期課程修了。同年同大学院国際公共政策研究科助教。2011 年より東北大学電気通信研究所助教。博士(情報科学)。



浅利 勇佑

2016 年 3 月東北大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻博士課程(前期 2 年)修了。2015 年 4 月株式会社 NTT データ入社。



エフド シャーリン

1997 年ベングリオン大学博士前期課程修了。2003 年アルバータ大学博士後期課程修了。2004 年カルガリー大学准教授。2015 年東北大学電気通信研究所客員准教授。ヒューマンロボットインタラクションの研究に従事。

Ph.D. in Computer Science.



ソール グリーンバーグ

1984 年カルガリー大学博士前期課程修了。1989 年同大学博士後期課程修了。カルガリー大学教授。2013 年 ACM フェロー。ユビキタスコンピューティングの研究に従事。Ph.D. in Computer Science.



北村 喜文 (正会員)

1987 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同年キャノン株式会社, 1992 年 ATR 通信システム研究所, 1997 年大阪大学大学院工学研究科/情報科学研究科助教/准教授。2010 年東北大学電気通信研究所教授。

博士(工学)。