

自律移動・変形する壁型ディスプレイの設計と評価

大山 貴史^{†1} 浅利 勇佑^{†1} 高嶋 和毅^{†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}

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ディスプレイ（自律変形壁ディスプレイ）について検討する。まず、デザインスタディにより壁ディスプレイの利用形態を調査し、その結果に基づいて自律変形壁ディスプレイと変形操作のためのインタフェースを検討する。デザインスタディの結果、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の基本的な形や変形方法の指針を構築することができた。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ディスプレイおよびそのインタフェースの実装例を示した。

A Study of Self-Actuated Dynamic Wall Display

Takafumi Oyama^{†1} Yusuke Asari^{†1} Kazuki Takashima^{†1}
Ehud Sharlin^{†2} Saul Greenberg^{†2} Yoshifumi Kitamura^{†1}

Abstract: This paper explores a self-actuated shape-changing 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 self-actuated dynamic 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 dynamic 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.

1. はじめに

作業空間には、PC、スクリーン、ホワイトボード等の多くのディスプレイが存在する。人はこれらを介し、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っている。そのため、これらディスプレイの形状や配置は、人の行動の促進または抑制などに大きな影響を与えることが知られている。例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り（F-formation[16]）、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。オフィスや研究室など様々な構成員からなる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常に変化していく。

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と位置は固定され

ていることが多く、マルチスクリーンを利用するにはカーブなどをつけることはできるものの、多くの場合はフラットスクリーン（例：会議用の大型モニター）である。これは、情報共有や大きなコンテンツを扱う場面では有意義であるが、作業形態（一人か複数人か）や内容（共有かプライベートか）によって、求められる作業空間やディスプレイ構成は異なる。したがって、固定された配置のディスプレイだけでは、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、ユーザの空間的で社会的な行動を阻害してしまう恐れもある。

例えば、複数の壁面ディスプレイを組み合わせる利用する際に、それらの配置を手動で変更して使うことは、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である。複数人で利用できる環境で言えば、カスタマー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 Display[14]などが典型的な研究例である。しかし、複数人で共有できるほど大きな画面を持つデ

^{†1} 東北大学 電気通信研究所
Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University
Engineering

^{†2} University of Calgary, Canada

イスプレイに対して、手で形状を変形させることは手間であり、効率や負荷の面で現実的ではない。

そこで他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。例えば、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, 22]。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よりダイナミックな変形を実現するディスプレイも、すでに開発されている[3, 23]。ただし、これらの目的は作業空間の改善ではなく、あくまでもエンタテインメントである。これらに対し我々は、TransformTable[25]という周囲の状況に応じてテーブルが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、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よいものにすることを目指している。しかし、テーブルの水平面は、複数人にて情報を共有する場面に常に適する訳ではなく、多様性のある協調的作業環境を考慮すると、壁面ディスプレイについて検討することも意義がある。

そこで本稿では、作業形態に応じて自動的にその形状と配置の変更が可能な壁型ディスプレイを提案し、その利用シナリオを通して実用可能性について検討する。まず、ユーザが、どのような形状の壁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、あらゆる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（自律変形壁ディスプレイ）のプロトタイプを実装した。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、表示されるコンテンツや空間配置をシステム自体が認識することで、自律的に変形することも可能である。これにより、自律変形壁ディスプレイは様々な動的なコンテキストに対応し、常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等、様々な形態のものが日常的に利用され、その操作法も、キーボードやマウス等の外部機器を用いたものや、タッチやジェスチャ等の身体的なものなど、ディスプレイ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。例えばArditoら[2]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。ある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[18]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、Endertら[4]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。

また、議論やブレインストーミング等の実際の作業場面を考えると、個人での作業とグループでの作業は混在することがある。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。そのため、立ち位置に応じて異なったコンテンツの表示が可能であるディスプレイ[13, 15]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[9]）。この概念を応用し、人数や立ち位置等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[17, 28]。例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捉え、より詳細な画面を表示する。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。

このような心理学の概念を用いたインタフェースの開発は、近年盛んに研究されている。例えば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[16]はこのF-formationに基づき集団の関係を推測し、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。他にも、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についての研究[18]や、壁などの一般的な平面への投影[20]を行う際にもF-formationは利用され、変化する状況に応じて、表示コンテンツを変化させている。

我々が本稿で提案する自律変形壁ディスプレイも、空間的な配置や作業内容などの状況に応じて最適なインタフェースを実現することができるが、表示コンテンツの変化ではなく物理的なディスプレイの表面形状そのものを変化させる。このような物理的な変化はより直感的で、ユーザに大きな影響を与えられと考えられる。

2.3 手動変形型ディスプレイ

いくつかの研究では、ディスプレイ形状を手動で変更することの意義を主張している。ConnectTable[27]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、2人のユーザがConnectTableを連結させると、協同作業がしやすいようにインタフェースが変化する。またChained Display[14]は、より物理的な形状変化について論じた研究である。連結された6枚の直立のプラズマディスプレイを公共空間に置き、その形状変化による影響を調べたものである。平面型、柱型、凹型などいくつかの配置が試され、実際にユーザのインタラクションが変化することが確かめられた。だが、ユーザが自ら変形させる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カスタマイズを検討している。

2.4 ロボティックディスプレイ

自動で変形できるディスプレイの研究はいくつか行われてきた[1, 22]。例えばTilt displays[1]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。しかしこれらはモバイル機器程度の大きさであり、複数人などの作業空間を想定したものではない。TransformTable[25]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。このように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。

移動可能なロボティックディスプレイも研究されている。遠隔地同士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]、最近我々は自律移動が可能な複数のデジタルテーブルMovemenTable[26]を開発し、物理的な作業空間のデザインや再構成の方法について検討している。また、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, 23]。これらの動きは美しく、変形可能なディスプレイの可能性が感じられるが、アート作品であり、作業空間の再構成に向けたものではない。

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、まずはユーザの壁ディスプレイの利用を観察し理解する必要があることと、変形壁ディスプレイを設計するにあたっての基本的な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、利用者は常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。



図 1. 利用した 6 つのコンテンツ

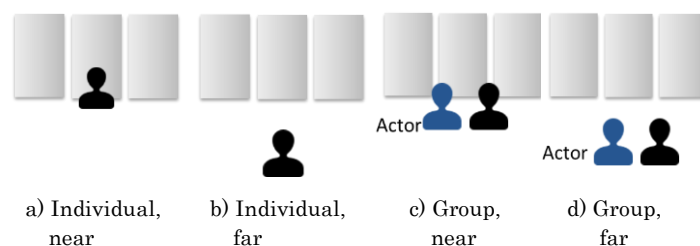


図 2. 想定した 4 つの空間配置

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、場面を検出したのちに自律的に変形する壁ディスプレイの可能性も出てくる。

3.1 実験方法

ここでは、ディスプレイをどれくらいの距離から何人で利用するのか、コンテンツは何か、といった複数の異なった場面（以降、シナリオと呼ぶ）を用意した。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 名

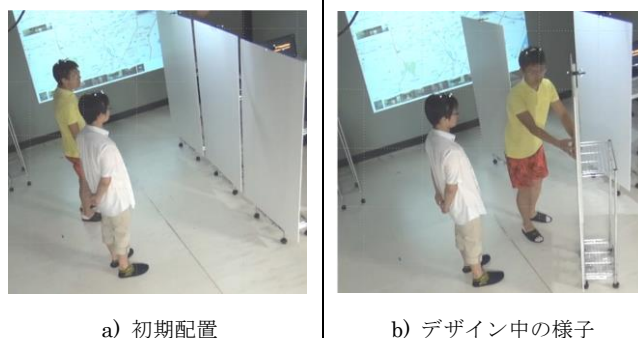


図 3. デザインスタディの様子

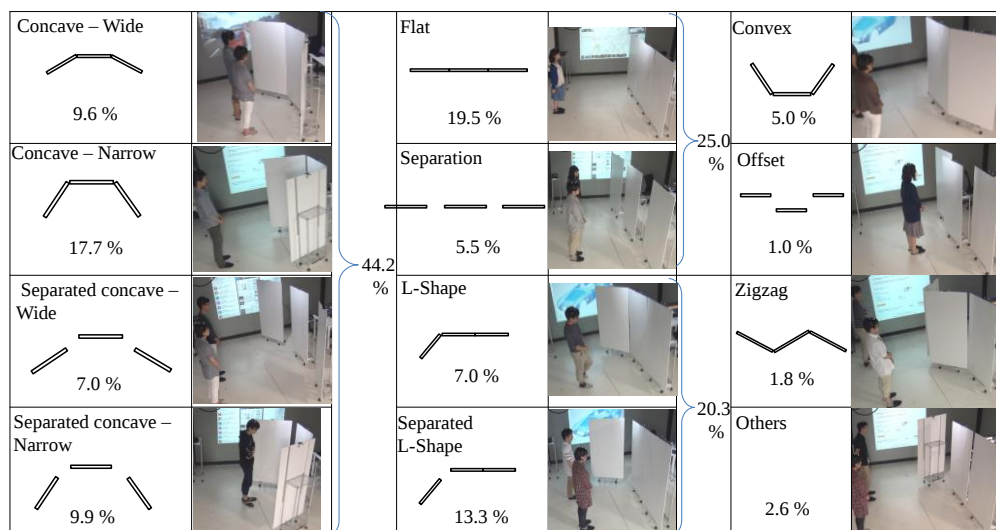


図 4. 得られたディスプレイ形状

の大学生（男性 11 名，女性 5 名，平均年齢 22.9 歳）で，一人ずつ行われた．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 x 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．

シナリオは全部で 24 通りあり，それらは 6 つのコンテンツと 4 つの空間配置から成る (24 試行=6 x 4)．参加者は，それぞれの試行が始まる前に想定シナリオ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デザインすることを求められた．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．次にこのコンテンツそれぞれに対し，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．

実際にこのような壁ディスプレイを利用する際は，他にも多くの要因があることは確かである．例えば，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，等によって利用形態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，今回はより基本的な利用形態を調べたいため，作業内容と空間配置という 2 つ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た．

また，スクリーンの構成を 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過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（フォント等含む）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 枚全てを用いてディスプレイ形状をデザインする．この時，初期配置の平面のままでも構わないことも指示されている．この間，ビデオカメラ (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，その情報を我々が IC レコーダーを用いて記録した．

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 x 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渡るものの，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り，それぞれの角度の大きさに

表 1. シナリオごとのディスプレイ形状

	Individual - Near		Individual - Far		Group - Near		Group - Far	
	Top 1	Flat	Top 1	Flat	Top 1	Flat	Top 1	Flat
Large Map	 31.25%	 6.25%	 56.25%	 31.25%	 56.25%	 12.5%	 31.25%	 37.5%
Private/ Sensitive View	 50%	 0%	 37.5%	 12.5%	 25%	 6.25%	 25%	 12.5%
Immersive Game	 50%	 6.25%	 25%	 25%	 50%	 6.25%	 50%	 12.5%
Multi- task Windows	 62.5%	 0%	 25%	 6.25%	 31.25%	 6.25%	 50%	 0%
16:9 Film	 43.75%	 31.25%	 18.75%	 68.75%	 37.5%	 18.75%		 62.5%
3D Model	 31.25%	 12.5%	 18.75%	 43.75%	 25%	 18.75%	 18.75%	 31.25%

応じ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Wide, より大きいものはNarrowと分類した。また、各スクリーンが10cm以上離れたものはSeparated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Separated型を分類した。他にも、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、冒頭で設定した課題について考察する。まず、どのような状況でも常に平面が好まれるのか、という項目について、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。比較の為、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。

◆ Large Map

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(Individual)とグループ(Group)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(Far), 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。

◆ Private/sensitive View

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為であり、左右の壁は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

れるということは無かった。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、プライバシーを守るため、ジグザグ型や1枚だけ別方向を向いた形状など、協同作業者の目を遮るための様々な工夫が見られた。

◆ Immersive Game

ほとんどの参加者はゲーム画面に没入感や臨場感を求めており、ゲームセンター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、離れるとより平面に近づく傾向が見られた。

◆ Multi-task Windows

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なようであった。

また数は多くは無かったが、Group-Nearにおいて、何人かが凸型のディスプレイをデザインした。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。

◆ Wide 16:9 Film

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。だが映画は平面で観たい・観るもの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Group-Far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。



図 5. プロトタイプ

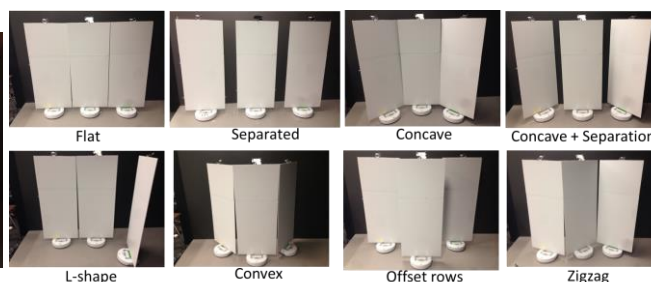


図 6. 基本形状

◆ 3D Model

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。ある特定の形状が選ばれやすいということは無かった。

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作業の場面が異なれば、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、または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い。広い表示領域を持つため、複数人によって情報を共有しやすい等様々なメリットがあるものの、その大きさ故に通常は手動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、システムが自動的に検出することが可能なコンテンツ内容や、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二種類を検討した。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（デザインスタディでも用いた情報）に応じて常に最適なディスプレイ環境を提供するシステムになる。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

自律変形壁ディスプレイ（図5）は3枚の直立スクリーンから構成されている。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(61 x 150 cm)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ー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伴い歪みが生じるため、Homography 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、マーカーの位置・姿勢から動的な補正が可能である。実装は openFrameworks[19]で行われた。

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

提案する変形壁ディスプレイでは、各スクリーンを独立に動かすことも出来るが、デザインスタディから得られた知見をもとに、我々はいくつか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等、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

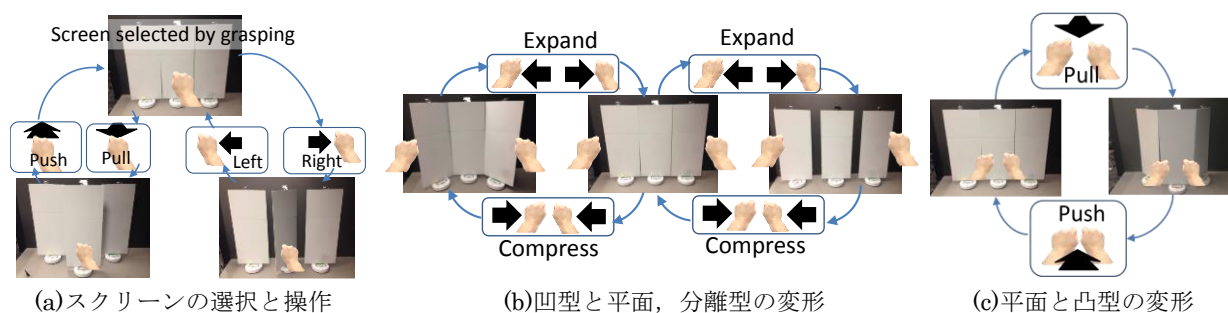


図 7. ジェスチャによるインタラクション



図 8. ジェスチャによる利用シナリオ

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

ここで言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する方法である. これにはマウスやスマートフォン等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. 我々は全ての操作に「掴む—動かす—離す」という実世界のメタファを統一して使い, スクリーン上方に設置した Kinect により手の動きを検出した. 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にし, 変形の結果もジェスチャに呼応するものとした.

例えば図 7(a)では, ユーザは片手を掴むことで 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 枚全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り替えも, ジェスチャにより可能である. 図 7(b)では, 凹型・平面型・分離型の切り替えを, 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・凸型の切り替えを, 両手を押す, 引くというジェスチャで行っている.

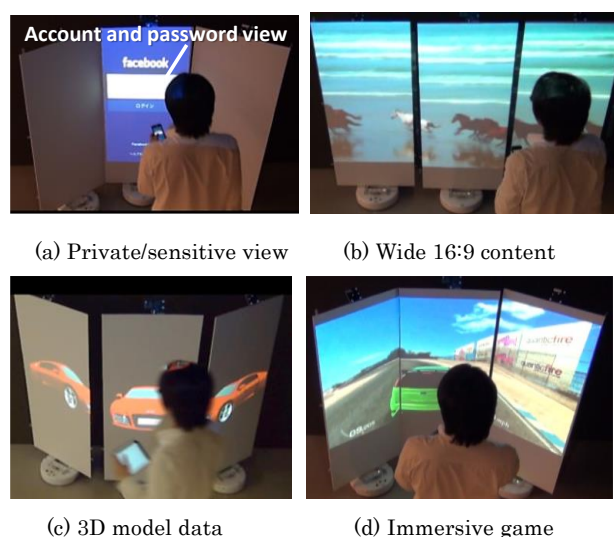


図 9. コンテンツに応じたディスプレイの変形

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へ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.

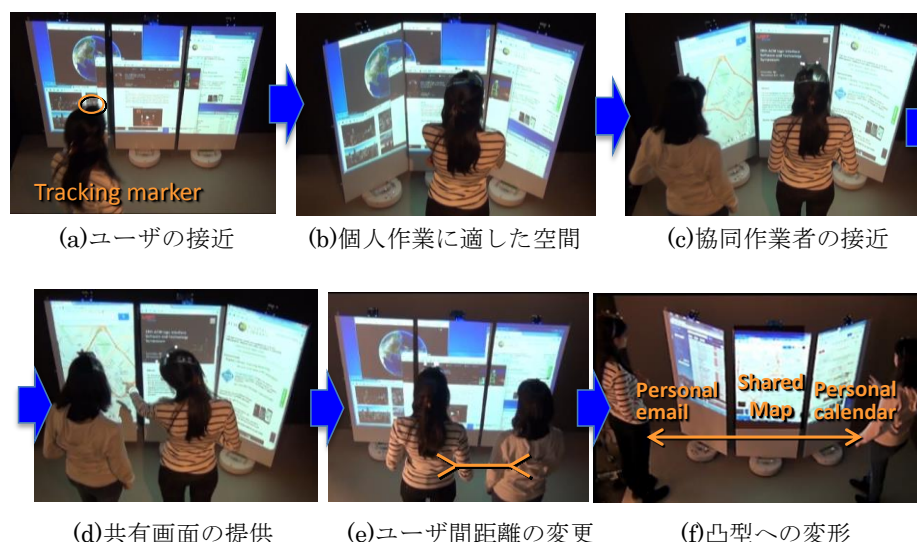


図 10. 空間配置によるインタラクションシナリオ

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。指示が無くとも、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出来る。そこで我々は、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。そのため、コンテンツに適したディスプレイ形状に自動で変形可能となっている。

図 9 にその一例を示す。例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(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(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(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(d)。

現状では、コンテンツ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

我々のデザインスタディが示したのは、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ということであった。そこでデザインスタディの結果と Proxemics interaction[17]の考えに基づき、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 Far と Near に対応している。デザインスタディにおいて Near 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・ゾーンにいる場合、

ユーザの位置や人数、2 人以上の場面では F-formation[16,17]と呼ばれるお互いの距離関係から、最適なディスプレイ形状を予想し変形する。

図 10 に利用シナリオの例を示す。まずインタラクション・ゾーンに誰もいない場合、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(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(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[8]と呼ばれ、計画を立てる場面や、ゲーム、議論を行う場面等が相当する。例えば、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(c)、1 枚のスクリーンが平面になり、共有画面を提供する(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(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(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ンダー等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等を共有している。個人作業が終わり、再び協同作業へと戻る場合も、お互いが近づきだけでディスプレイが平面へと戻る(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。例えば図 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み合わせによる変形

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。例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、左右の角度を最適に設定することが可能となる。

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[12]、最もシンプルな方法は変形に制約を設けることである。例えば、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。だが我々の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つの方法である。その有用性は大きいと考えられる。

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、インタラクションの方法として、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、という検証はまだ行えていないのが現状である。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、といった検証が必要である。さらにそこから得られた知見をもとに、より良いインタラクションの方法を検討していくことが必要である。

多様なディスプレイ形状

ディスプレイ形状の変化がもたらす影響については、ユーザによる実験的検証が必要であるが、ある程度推察できる。それは様々なディスプレイ形状が既に日常生活において用いられており、また多くの研究でも検討されているためである。我々の設計もそしてデザインスタディの結果も



図 11. インタラクション領域



図 12. エラー処理

多分に日常的な慣習の影響を受けている。例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ー等、没入感が重要な場面で既に利用されている。凸型は、[21]においてキューブ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。また、一部のサインージなどでは見られる構造である。[24]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、テーブル型等、様々な形状を実現し論じている。また、研究に限らずとも、駅構内や街角には広告のための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既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ディスプレイはそれらを統合したユニバーサルなものとして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を検証と並行して我々が今後取り組むべき課題は、システムの設計を見直すことである。まず、スクリーンの枚数である。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。プロジェクションの問題は残るが、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。

次に検討すべきは、変形の際の動きである。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。これは、作業に重要なのはまずディスプレイ形状だと考えたためである。しかし今後、実際の検証を行った場合、変形の動き自体がユーザに影響を与える可能性も少なくない。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の自由度となるため、四輪駆動のロボット等、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も、ユーザに影響を与える重要な要素である。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、これだとユーザ自身の影がスクリーン上に生じてしまう、投影範囲も大きくはないという問題がある。

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(角度の急な凹型や凸型など)。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。理想的にはデジタル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、その実装による検討事項も多い。

7. まとめ

本稿では、作業空間を支援する、自律移動・変形が可能な壁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つの空間配置から成る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、L型、凸型等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成る自律変形壁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)および東北大学電気通信研究所共同プロジェクトによる。

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*, 161-170.
- [2] Ardito, C. Buono, P., Costabile, M., and Desolda, G. Interaction with Large Displays: A Survey. *ACM Comput. Surv.* 47, 3, Article 46, 2015, 38 pages.
- [3] Box by Bot & Dolly
<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*, 58-65.
- [5] Double Robotics <http://www.doublerobotics.com/>
- [6] Gjerlufsen, T., Klokmose, C., Eagan, J., Pillias, C., and Beaudouin-Lafon, M. Shared substance: developing flexible multi-surface applications. *CHI '11*, 3383-3392.
- [7] Gomes, A., and Vertegaal, R. PaperFold: evaluating shape changes for viewport transformations in foldable thin-film display devices. *TEI '15*, 153-160.
- [8] Gutwin, C. and Greenberg, S. A descriptive framework of workspace awareness for real-time groupware. *Journal of Computer Supported Cooperative Work* 11(3-4), 411-446, 2002.
- [9] Hall, E. The hidden dimension: Doubleday 1966.
- [10] Hinckley, K., Dixon, M., Sarin, R., Guimbretiere, F., and Balakrishnan, R. Codex: a dual screen tablet computer. *CHI '09*, 1933-1942.
- [11] Ichino, J., Isoda, K., Hanai, A., and Ueda, T. Effects of the display angle in museums on user's cognition, behavior, and subjective responses. *CHI '13*, 2979-2988.
- [12] Ju, W., Lee, B.A., Klemmer, S.R. Range: exploring implicit interaction through electronic whiteboard design. *CSCW '08*, 17-26.
- [13] Karnik, A., Plasencia, D., Mayol-Cuevas, W., and Subramanian, S. PiVOT: personalized view-overlays for tabletops. *UIST '12*, 271-280.
- [14] 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*, 317-326.
- [15] Lissermann, R., Huber, J., Schmitz, M., Steimle, J. and Max Mühlhäuser. Permulin: mixed-focus collaboration on multi-view tabletops. *CHI '14*, 3191-3200.
- [16] Marquardt, N., Hinckley, K., and Greenberg, S. Crossdevice interaction via micro-mobility and f-formations. *UIST '12*, 13-22.
- [17] Marquardt, N. and Greenberg, S. Proxemic interactions: from theory to practice. series: Synthesis Lectures on Human-Centered Informatics, Morgan & Claypool Publishers, 2015.
- [18] Nacenta, M., Sakurai, S., Yamaguchi, T., Miki, Y., Itoh, Y., Kitamura, Y., Subramanian, S. and Carl Gutwin. Econic: a perspective-aware interface for multi-display environments. *UIST '07*, 279-288.
- [19] openFrameworks. <http://openframeworks.cc/>
- [20] 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*, 23-26, 2003.
- [21] Pla, P. and Maes, P. Display blocks: a set of cubic displays for tangible, multi-perspective data exploration. *TEI '13*, 307-314.
- [22] Rasmussen, M. Pedersen, E., Petersen, M., and Hornbæk, K. Shape-changing interfaces: a review of the design space and open research questions. *CHI '12*, 735-744.
- [23] Roboscreen: <http://roboticarts.com>
- [24] Schmidt, R., Penner, E. and Carpendale, S. Reconfigurable Displays. *UBICOMP'04 Workshop: Ubiquitous Display Environments*.
- [25] Takashima, K., Aida, N., Yokoyama, H., and Kitamura, Y. TransomTable: a self-actuated shape-changing digital table, *ITS '13*, 179-188.
- [26] Takshima, K., Asari, Y., Yokoyama, H., Sharlin, E., and Kitamura, Y. MovemenTable: The design of moving interactive tabletops, *INTERACT2015, LNCS 9298*, 296-314.
- [27] 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*, 11-20.
- [28] Vogel, D., and Balakrishnan, R. Interactive public ambient displays: transitioning from implicit to explicit, public to personal, interaction with multiple users. *UIST '04*, 137-146.