

自動変形可能なタイル型デジタルテーブルを用いた ユーザのリーチ拡張に関する検討

工藤 義礎[†], 高嶋 和毅[†], モルテン フィールド[‡], 北村 喜文[†]

概要: 大きなデジタルテーブルを使用する際、その上の遠くに表示されたコンテンツを操作することは腕の長さの限界から難しい。そこで本研究では、ユーザの操作可能範囲（リーチ）を拡張することを目的とし、自動変形可能なデジタルテーブルを検討する。複数の小型デジタルテーブルをタイル状に配置して大きなテーブルを構成し、それぞれの位置をモバイルロボットによって個別に制御することでテーブル面の形を自動変形させる。例えば、テーブルを分割できれば、ユーザはそれによって生じた空間（テーブルの内部）に立つことができるため、テーブル面端のコンテンツも無理のない姿勢で操作することができる。このように、これまで静的であったテーブル面の形状を状況に応じて自動変形させることで、ユーザのリーチを大幅に拡張することができる。本研究では、複数のデジタルテーブルを連携利用した場合、ユーザはどのようなレイアウトを好むかを調査し、主要な5つのレイアウトを見出した。その結果をもとにしてプロトタイプを作成し、既存の代表的なインタフェースであるパン（スクロール）と比較して、提案する自動変形型デジタルテーブルが、いくつかの条件において早く低負荷なインタラクションを実現できたことを確認した。

Extending Reach in Large Digital Tables by Tiled-Display Configuration

Yoshiki Kudo[†], Kazuki Takashima[†], Morten Fjeld[‡], Yoshifumi Kitamura[†]

Abstract: When using large interactive tabletops, users may have difficulties in accessing distant objects due to their limited physical reach. To address this issue, we explore a reconfigurable multi-display tabletop that can adapt its shape in ways that extend users' reach by controlled self-actuated display sliding. We conducted a design study to find layouts preferred by users in terms of physical demand and frustration level. Based on the five major layouts from the study, we developed a prototype of the system and implemented a control interface that allows users to translate it. We then conducted a study comparing the proposed system with a conventional panning technique. Results show that for several task categories, the proposed system offers more efficient and effortless interactions that benefit from users' extended physical reach.

1. はじめに

我々の知的作業の多くは机やテーブルの上でなされる。広いテーブルを使うことができれば、より多くの情報や物を作業面に配置できるため、情報の一覧性が高まり、整理や分類の作業効率は向上する。また、複数人での作業においても、十分なスペースを提供することができる利点もある。インタラクティブデジタルテーブル（以降、デジタルテーブル）はそのような什器としてのテーブルの特徴を拡張したもので、デジタルデータをテーブル面に表示させ、タッチ入力等により操作することができる。市場には既に様々なデジタルテーブルが登場しているが、大型の場合 50 インチ程度のデジタルテーブルが多く、中には 100 インチを越える巨大なシステムもある (e.g., [22,23])。このような大型デジタルテーブルの作業面は、一人のユーザの作業を考えた場合でも、広大な情報を閲覧したり整理したりすることに向いているため、今後、様々な用途で多様な環境に導入が進むと期待されている。しかし、大きなテーブル面全体に対してタッチ入力や複雑な操作 (e.g., スケーリング

等) をする場合、ユーザの腕の長さの範囲（リーチ）外にあるコンテンツの操作は難しくなる。実際に、デジタルテーブル上の多くの作業はユーザのリーチの範囲内（立ち位置から 34cm の半径の円内）でなされるという報告もされている[24]。デジタルテーブルに限らず一般のテーブルにおいても、遠くの対象を無理のない姿勢で操作するためには、これまではテーブル周囲を歩いて対象の領域まで出向く必要があった。これはユーザの身体的な腕の長さ（リーチ）や取れる姿勢に限界があるために生じるものであり、デジタルテーブルに限らず、大型タッチディスプレイを利用するときの一般的な課題でもある。

この問題を解決するために、これまで様々な研究がなされている。最も一般的な方法は、スクロール等の画面遷移を利用して遠くのコンテンツをユーザの近く（リーチ内）に移動させる方法である。これは、一般的に広く利用されているが、ディスプレイ上の大局的な情報が意図に反して失われてしまうことが多く、それを補うために無駄なスクロール運動が多発する等、課題も多い。その他の方法として、カーソルやジェスチャ等を利用したインタラクション

[†] 東北大学電気通信研究所

[‡] Chalmers University of Technology

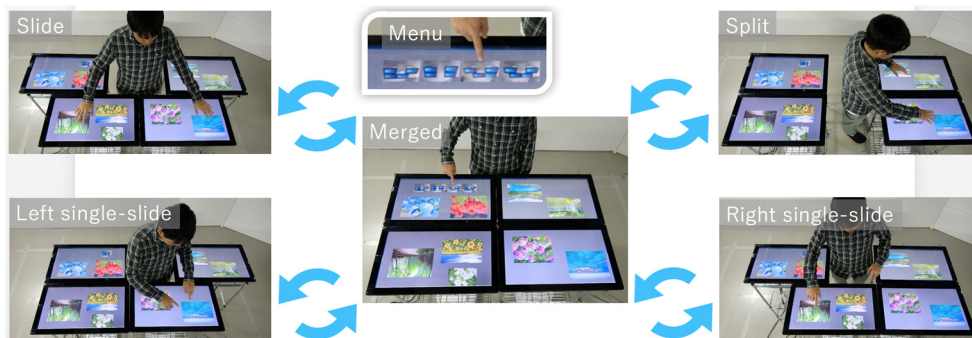


図1 4枚のデジタルテーブルの連携による大型デジタルテーブルの移動変形および状態遷移の様子
Figure. 1 With its four horizontal screens, the tabletop system offers flexible multi-display configuration.

等，多くの工夫が提案されているものの，カーソルを使った場合は基本的に，遠くのコンテンツに対して選択（e.g., クリック等）や移動といった単純な操作しかできず，タッチ入力を実現できるような繊細な操作（e.g., 二本指でのサイズ調整等）をすることは難しい．従って，広大なデジタルテーブルを利用する際に，そのテーブル面に表示されている大局的な情報を失わずに，遠方を含むテーブル面全体での操作領域をユーザに与える方法は考案されていない．

そこで本研究では，ユーザにデジタルテーブル全面で十分なリーチを与えるために，自動変形可能なタイル型のデジタルテーブルを新たに検討する．今回は，4つの小型デジタルテーブルをタイル状に配置して大きなテーブル面を構成する．その4つのデジタルテーブルはそれぞれモバイルロボットによる移動と回転の機能を持ち，状況，またはユーザの入力等に応じてそれぞれの配置を変えることで，テーブル面の形を変形させることができる．例えば，図1に示すように，ユーザが遠くのコンテンツを利用しようとしたときに，ユーザ手前のディスプレイを分割することで，ユーザはそれによって生じた空間を利用して，対象コンテンツの近くに立つことができる．このようにテーブルが自動変形してユーザが利用できる空間を増やすことでユーザのリーチを拡張することを狙う．ディスプレイの分割によって，コンテンツが一時的に分離されるという欠点はあるが，その場合でも，コンテンツは全てディスプレイ上にタッチ操作可能な状態で保たれるため，外部にコンテンツが移動するパンより大局的な情報を失いにくい．遠くのコンテンツへの操作が終わった場合や別のコンテンツの操作要求が発生した場合は，ユーザはテーブルの自動変形機能を用いて，直ちに元のレイアウトや異なるレイアウトに自動変形することができる．このように，本研究では，従来は静的であったテーブルの形を柔軟に自動変形する機構を設けることで，ユーザに広大なテーブル面全体へのリーチを提供する．これにより，ユーザがテーブル周囲を歩き回ることや不自然な姿勢になることを防ぎ，効率的かつ低負荷で快適なインタラクション環境を構築する．

2. 関連研究

本研究ではデジタルテーブルを扱うものであるが，本章では，壁面ディスプレイ等，人のリーチを越える大型ディスプレイの利用に関する研究について述べる．

2.1 リーチの拡張に関するインタラクション手法

大型壁面ディスプレイ利用時におけるユーザのリーチの問題については古くから指摘され[1]，その解決に向けたインタラクション手法は多数提案されてきた（e.g. [1] [4]）．最も一般的なアプローチは，パン，ズームや focus+context views [5]を利用するものである．これらは現在，多くのアプリケーションで利用されているが，大きな画面遷移が大局的な情報を把握しづらくする．より発展的なものとしてカーソルを利用する手法もある．例えば，I-Grabber は，手を仮想的に拡張して，ディスプレイ上の遠方での選択や移動を可能にしたものである[6]．HandyScope は，その拡張であり，選択や移動に加えスケーリング等のより複雑な操作が可能である[7]．また人のバーチャルな影をメタファにした手法もある[27]．Dynamic Portals は，複数人での作業時にコンテンツをディスプレイ上の指定されたある位置にワープさせることができる[8]．このような考えを空間ジェスチャによって実現するものも提案されている[9][25]．Gaze-touch では，視線入力を用いて操作対象を決め，手元のタッチ入力をその対象に反映するものである[10]．これは，広大なディスプレイ全体にリーチを与えることができるが，視線追跡装置の導入と運用面（e.g., オクルージョン等の計測上の課題）で課題がある．

上で述べた手法の中で，テーブル面全体にリーチを拡張でき，かつ現実的に利用できる可能性があるのは HandyScope[7]と Pointable[25]と考える．しかしながら，これらの手法は，セクションタスクにおいては有効であるが，スケーリング等複雑なインタラクションに関しては，ダイレクトタッチと比較して差がないことが報告されている[7][25]．以上のように，多くのインタラクション手法が提案されているが，選択や移動だけではなく，スケーリング等も含めた一般的な操作を考えた場合，パンを使って遠

くのコンテンツへのリーチを確保する方法は依然として有効であることが分かる。しかし、先にも述べたように、パン（スクロール）は、多くの場面において簡単で有効である反面、テーブル面全体を大局的な情報として利用するタスク（e.g., 地図上での戦略の検討やパーツの組み立てタスク等）の場合は、簡単に大局的な情報を失ってしまうという問題が生じる。そして、それを補うための追加のインタラクションが発生する可能性が高い。本研究では新たなアプローチとして、大きな単一のデジタルテーブル面を利用するのではなく、複数の小型のテーブルを組み合わせ、ユーザの作業位置に柔軟に対応できるようにすることでリーチの課題に取り組む。

2.2 複数および手動変形型ディスプレイ

タスクによっては、平面のディスプレイが常に直接的なタッチ操作等に対して効果的ではないということが知られているため、状況に応じて手動変形または再構成可能なディスプレイの研究も盛んになされている。例えば、広大なタイル型ディスプレイを構築する際の、ユーザを取り囲むディスプレイ間の角度とユーザの作業効率の関連を調べた研究がある[3]。その他 Lischke らは、複数のディスプレイの配置の効果を調べ、幾つかの有望な配置を推薦している[11]。この研究では鉛直ディスプレイが使われているが、タッチインタラクションが必要なときにはユーザはその到達性（リーチ）を改善できるレイアウトを好むことが示されている。これは本研究での動機にも関わる報告である。

複数のディスプレイを利用して手動変形が可能なものもある。例えば、ConnecTable は、一人用の移動可能なデジタルテーブルで、ユーザが持ち運びし、複数台を結合したり分割したりして作業状態に応じて適切な大きさの作業空間を作ることができる[12]。本研究においても、複数ディスプレイによって柔軟な大きさと形状のテーブル面を構築する方法をとる。しかしながらこれらの研究では、手動により構成を変更するものであるため、ユーザの負荷や変形精度について課題がある。一方で、本研究では、自動変形機構を導入することで、よりユーザにとって低負荷に、適切な作業面を確保することを考える。

2.3 自律移動・変形型ディスプレイ

近年はディスプレイに移動機構を設けて、自律的にディスプレイ構成を変更することで適切な作業空間を提供する研究が増えてきている。例えば、Bader らはモータをタブレット PC に取り付け、ホワイトボード上でそれらを自律的に走行させることで、その場の状況に応じて適切な情報を発信する方法を検討している[13]。LivingDesktop は、ディスプレイやキーボード、マウスの位置を自動的に変更するコンセプトモデルである。机の上のディスプレイは、人の位置や表示コンテンツに応じて水平移動や回転が可能である[14]。Shape-shifting wall displays は複数枚のディスプレイからなる自律移動・変形型の壁ディスプレイであり、それ

ぞれのディスプレイの位置や角度を変えて様々な形の作業空間を動的に作り出すことができる。この研究では、ユーザのジェスチャや立ち位置等、または表示コンテンツに応じて移動変形がなされるような仕組みが提案されている[15]。Multi-tiles は複数枚のディスプレイがタイル状に配置された1枚の壁型ディスプレイである。それぞれのディスプレイの角度をモータにより変えることができ、聴衆の立ち位置等に応じた情報提示等を実現している[16]。

水平面ディスプレイを持つデジタルテーブルに対しての検討もある。MovementTable[17]は自律移動型のデジタルテーブルであり、複数台を結合したり分割したりすることで、個人作業と協調作業をシームレスに切り替える方法等が検討されている。TransformTable は、自律変形型デジタルテーブルであり、円形、正方形、長方形のいずれかの形に自律的に変形することができる。これにより、異なるソーシャルインタラクションやコンテンツを適切に支援する作業空間を作ることができると報告されている[18]。Proxemic Transitions は、ディスプレイの傾きを自動的に変えることで壁ディスプレイとテーブルディスプレイを滑らかに切り替えるコンセプトを提案している[19]。

以上のようにディスプレイを自律移動または変形させることにより、よりよい作業空間を提供する方法についての研究は盛んになされており、すでにその効果は多くの研究で証明されている。ただし、本研究の目的であるユーザの身体的特徴であるリーチの課題を、ディスプレイの変形を通して解決しようとした研究はない。

本研究では、自動変形可能なディスプレイを検討し、実装を進めていくが、その前に、どのようなディスプレイレイアウトがどのような効果を持つのかを事前に知っておく必要がある。次章ではこの点に取り組む。

3. レイアウトデザインスタディ

本研究では、小型のデジタルテーブルを連携利用することで、大型でありながらも、ユーザにとってより快適なレイアウトを提供するシステムを構築する。これに向けて本章では、自動変形可能なデジタルテーブルの設計指針を得るためのレイアウトデザインスタディについて述べる。実験では、(1) いつユーザはテーブルのレイアウトを変更しようと思うか、(2) レイアウトを変えた場合、それによって身体疲労や精神的ストレスを軽減することができるか、また、(3) どのようなレイアウトがユーザに多く好まれるか、を検証した。

3.1 方法概要

本実験では、ユーザが手動で簡単に移動と回転ができる4台の小型デジタルテーブルで構成される大型デジタルテーブルを対象とした。実験参加者はこのデジタルテーブル上で、2種類のタスク（以降、タスク）を、7つのターゲット分布シナリオ（以降、シナリオ）で実施した。また、そ

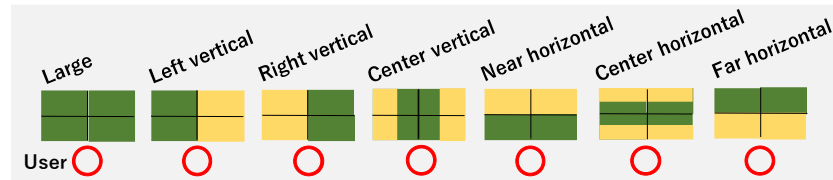


図2 7つのターゲット分布シナリオ（緑色：インタラクションの回数が多い，黄色：インタラクションの回数が少ない）
Figure. 2 Seven target distribution scenarios: green contents trigger more interaction while yellow contents trigger less interaction.

れらを実施するにあたり，参加者は与えられた状況において，より快適に作業できるレイアウトをテーブルの位置や角度を変えてデザインした．タスク後，参加者は，デザインしたレイアウトによる身体疲労や精神的ストレスへの影響を調査するためのアンケートとインタビューに回答した．

3.1.1 実験環境

大型デジタルテーブルは，27 inch マルチタッチディスプレイ（iiyama, ProLiteT2735MSC, W: 67.3 cm, D: 41.9 cm）をボールキャスターのついたメタルラックの上に上向きで載せたものを4台組み合わせた．それぞれのディスプレイは実験用のデスクトップ PC1 台に HDMI および USB ケーブルで繋がれており，1つの大きな Windows デスクトップとして利用することができる．ケーブルは束ねられ，実験参加者はそれぞれのテーブルをボールキャスターにより簡単に動かすことができる．4台を結合したときのデジタルテーブルはベゼルを除いて 54 インチ程度のサイズである．これは，27 インチの小型デジタルテーブルを4台利用することによるが，現在一般的に使用されている大型のデジタルテーブル（e.g. 55 inch MS Hub や ideum Pro[20]）と同等である．テーブルの床からの高さはリーチに影響を与えるため，人間工学での知見を考慮し，今回の実験においては，日本人男性の平均身長を基準に 106cm に設定した[26]．50 インチ程度のデジタルテーブルでは，ユーザの身長や腕の長さによっては，ディスプレイの端に手が届かないといったリーチの問題を常に起こすとは限らない．しかし本研究では，市場製品や人の視野角等を考慮した時に，50 インチ程度が一人利用した場面に有効と見られることと，リーチの問題が発生し始める最少サイズであることから，多様なテーブルレイアウトデザインがなされることを期待してこれらの条件を決定した．なお，我々の予備的調査では，市販品の中でもかなり大型の 80 インチのデジタルテーブルを設定した場合は，全参加者がディスプレイの半分程度の領域にしかリーチできないという状況であった．このサイズでは，複数人利用を含めた別の検証が必要であると考えられる．実験ソフトウェアは Unity で作成したものを利用し，実験中は，参加者の姿を側面と頭上から観察するようにビデオカメラを設置して実験の様子を記録した．

3.1.2 タスクデザインとターゲット分布シナリオ

本実験で参加者に課せられた最も重要な課題は，与えられたタスクを快適に行う為にデジタルテーブルのレイアウトをデザインすることである．その基準として，2種類の

タスクとターゲット分布を表す7つのシナリオを用意した．

タスク：リーチングとドッキングの2種類を用意した．リーチングはデジタルテーブル上での最も基本的なインタラクションの1つであり，ディスプレイ上に表示されたターゲットをタッチすることを指す．ドッキングはリーチングよりも複雑で繊細さが求められる作業を想定しており，移動対象とターゲットの2つがディスプレイに表示される．ユーザは，タッチして移動対象を獲得した後にドラッグとピンチ操作を行い，それをターゲットに重ね合わせる．

ターゲット分布シナリオ：ディスプレイ上のターゲット（タッチやドッキングの対象）の位置は，ユーザの姿勢，作業効率や身体疲労に影響を与えると予想されるため，7つのシナリオを用意した．シナリオは，ターゲットが密集して発生するインタラクションの回数が多い領域（緑色）とインタラクションの回数が少ない領域（黄色）の分布からなる．参加者の位置から見た7つのシナリオは，図2に示すように，Large（全領域でターゲットとそれに伴う操作が発生），Left vertical（左側縦方向にターゲットとそれに伴う操作が集中），Right vertical（右側縦方向にターゲットとそれに伴う操作が集中），Center vertical（中央縦方向にターゲットとそれに伴う操作が集中），Near horizontal（手前横方向にターゲットとそれに伴う操作が集中），Center horizontal（中央横方向にターゲットとそれに伴う操作が集中），および Far horizontal（奥側横方向にターゲットとそれに伴う操作が集中）とした．リーチングタスクでは，緑色と黄色の領域にそれぞれ 80%，20%の確率でターゲットを出現させた．ドッキングタスクでは，緑色の領域では必ず移動オブジェクトのサイズ調整が必要で，黄色の領域では移動オブジェクトと黄色領域に表示されているターゲットのサイズが同じなのでサイズ調整を行う必要はないようにした．いずれのタスクでも，Large シナリオにおいては画面全体に均等にターゲットが配置された．

それぞれのタスクに関して，リーチングタスクはマップアプリケーションをメタファとしている．場所を検索することで該当場所にピンが表示され，ユーザはそれをタッチすることで詳細な情報を逐次的に見るという状況を想定している．ドッキングタスクは，アセンブリタスク（e.g., 図形の組み立て）をもとに設計されている．タッチやドラッグのほかにスケーリングが必要な作業を行う領域（メイン領域）と，タッチとドラッグ操作だけが必要な領域（サブ領域）が表示されており，メイン領域では，オブジェクト



(a) リーチングタスク開始前 (b) リーチングタスク試行中 (c) ドッキングタスク開始前 (d) ドッキングタスク試行中
図3 リーチングタスク (a と b) とドッキングタスク (c と d)

(a) Initial view of reaching task (b) Reaching task sequence (c) Initial view of docking task (d) Docking task sequence

Figure. 3 Reaching task (a and b) and docking task (c and d)

に対して移動だけでなく大きさを変えて目的の位置に重ね合わせる作業を想定している。また、サブ領域ではオブジェクトを選択しドラッグによりメイン領域にドロップすることで、オブジェクトを生成することを想定している。

3.1.3 実験デザイン

3.1.2 で述べた2種類のタスクと7つのターゲット分布シナリオの条件に加え、本実験はテーブルレイアウトを変えられない条件 (Merged) と変えられる条件 (Flexible) で構成されており、Merged, Flexible の順にタスクを行った。これは、Merged での経験を踏まえて、Flexible 条件でレイアウトデザインを深く考えさせるためである。7つのシナリオはカウンターバランスをとるため、それぞれのシナリオが14名中2名の参加者に対して必ず初めに行われるように設定された。リーチングタスクの総試行数は、参加者14名 × 7シナリオ × 2レイアウト状況 (Merged, Flexible) = 196 だった。ドッキングタスクにおいて用いた変数 (独立変数: レイアウト状況とシナリオ, 従属変数: アンケート) と手順は、リーチングタスクと同様に設定された。ただし、ドッキングタスクでもレイアウトの手動変形回数を2回確保するために、それぞれのシナリオを2回ずつ実施した。従って、ドッキングタスクの総試行数は、参加者14名 × 7シナリオ × 2レイアウト状況 (Merged, Flexible) × 2回繰り返し = 392 である。ドッキングタスクが1シナリオ中で1回だったのは、ドッキングタスクは開始直後にそのシナリオ中にターゲットとなるオブジェクトがすべて出現し、たとえ50%の時に手動変形の機会を与えたとしても参加者毎に残っているターゲットの状況が変わるためである。

全ての参加者はリーチングタスクから始め、次にドッキングタスクを行った。これは、単純な作業から入る方がドッキングタスクのパフォーマンスがより自然になり、正確なテーブルデザインができると考えたからである。リーチングタスクとドッキングタスクを直接的に比較しないため、この固定順が実験結果の解釈に影響を与えることはない。なお、本実験全体の計画や手順は複雑であるが、全て予備的調査に基づいて決定されている。

3.1.4 実験手順

図3の(a)と(b)は、リーチングタスクの初期画面と、リーチングタスクの1試行の流れを示している。リーチングタスクを始める前の初期画面に表示されている赤いピンがターゲットの分布を示している (図3(a))。これがター

ゲットの分布シナリオを意味し、ユーザはそれを確認した後に、ランダムに出現する赤い正方形のターゲット (一辺2cm) をタッチしていく。ターゲットの出現には、サウンドフィードバックも付加されている。ターゲットがタッチされると、そのターゲットは消失し、新しいターゲットがどこか違う場所にランダムに出現した (図3(b))。この試行が各々のシナリオ毎に30回繰り返し実施された。参加者は、Merged 条件で行った後に同じタスクをFlexible 条件で行った。このFlexible 条件を開始するにあたり、実験者は、参加者に、デジタルテーブルを無理に移動させることのないように、タスクを効率的かつ快適に作業できるといったときのみ移動させるように注意深く指示した。また移動させるときのポイントとして、効率的にかつ無理な姿勢で作業を行うことが少なくなる形状にするようにと指示した。参加者はそれぞれのシナリオに対して、タスクが始まる前と15回目の試行が終わった後 (中間地点) にレイアウトを変更することができた。これは、より多くのデザインを収集できるようにするためと、参加者によってはレイアウトの修正の機会があった方が良いという意見が予備的調査においてあったからである。参加者はそれぞれのシナリオが終わる度に、身体疲労と精神的ストレスに関する評価をするため5段階評価のアンケートに答えた。

図3(c)と(d)は、それぞれドッキングタスクの初期画面とドッキングタスクの1試行の流れを示している。ドッキングタスクが始まる前の初期画面は、アセンブリタスクを想定したターゲットの分布を表している (図3(c))。この画面によって参加者は与えられたターゲットの分布をまず確認する。その後、ドッキングタスクを継続していく。図3(d)に示すように、手元に表示された赤い正方形のオブジェクト (一辺7cm) を移動し、6つの黄色い正方形のオブジェクト (小×2 (一辺4.5cm, 5.5cm), 中×2 (一辺7cm), 大×2 (一辺9cm, 15cm)) に重ね合わせてゆくというタスクである。このとき、サイズを調整するために2本の指でのピンチ操作も必要な場合がある。黄色いオブジェクトの位置はそれぞれのシナリオごとに固定されていた。ドッキングタスクにおいて、赤いオブジェクトと黄色いオブジェクトはすべて開始直後に表示されたので、赤いオブジェクトを黄色いオブジェクトに重ね合わせてゆく順番は予め参加者が決めることができた。ドッキングタスクにおいても、Merged 条件で行った後に、移動に関する指示を注意

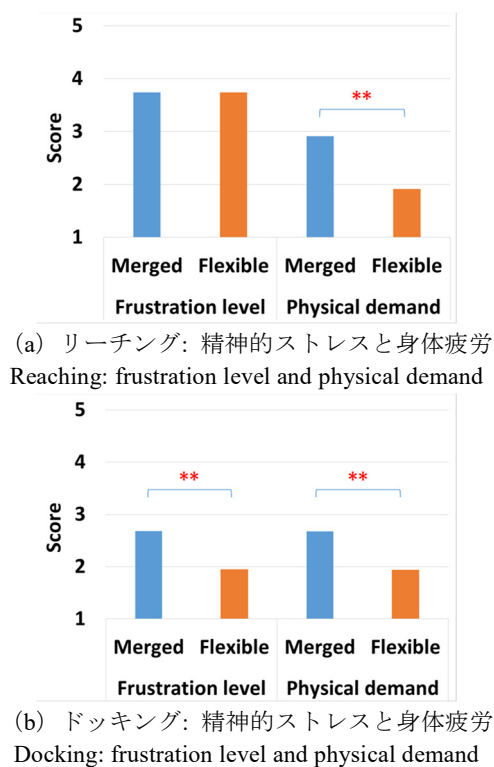


Figure 4 Results of the questionnaire

深く説明して Flexible 条件でタスクを実施した。なお、ドッキングタスクにおいては、オブジェクトは全て表示されているため、参加者はタスク開始前にだけレイアウトを変えることができた。各々のシナリオ毎に参加者は精神的ストレスと身体疲労に関するアンケートに答え、ドッキングタスク終了後、参加者はデザインに関するインタビューに答えた。

参加者は、図 3 に示すように、すべてのタスクをテーブルの長辺側に立って実施した。レイアウトを変えたことによってできた空間を移動することは許可したが、テーブルの周囲を移動することは許可しなかった。実験は、練習と休憩を十分にとり、アンケート等含めて 90 分程度の実験時間であった。またすべてのタスクについて、実験者は参加者に対してできるだけ早くタスクを行うことを要求した。

3.2 観察の概要

本デザイン実験では、(1) いつユーザはテーブルのレイアウトを変更しようと思うか、(2) レイアウトを変えたことによって身体疲労や精神的ストレスを軽減することができるのかどうか、(3) どのようなレイアウトがユーザに多く好まれるかの 3 点を検証した。

(1) に関しては様々な判定方法が考えられるが、今回は単純な方法として、参加者の半数以上がレイアウトを変えたときのシナリオを、レイアウトを手動変更しようと思った時であると判定した。その方法に従うと、リーチングタスクでは、3 つのシナリオ (Near horizontal, Center horizontal, Large) 以外、ドッキングタスクでは 2 つのシナリオ (Near

horizontal, Center horizontal) 以外でレイアウトの変更が多く見られた。いずれも傾向は似ており、遠くのコンテンツを操作する機会が多い時 (奥行方向のリーチング作業が多いとき等) に、参加者はレイアウト変更が多かった。

これ以降の結果に関しては、リーチングとドッキングタスクの両方で参加者の半数以上がレイアウトを変えなかった、2 つ (Near horizontal と Center horizontal) を除いた 5 つのシナリオ (Large, Right vertical, Left vertical, Center vertical, および Far horizontal) から得られたデータを用いた。

3.3 主観評価

(2) に関しては Merged と Flexible の状況時のアンケート結果を比較して、身体疲労と精神的ストレスへの影響を確認した。図 4 には、Flexible 条件においてレイアウトを変更した人のデータだけを抽出した Merge と Flexible の比較を示す。ウィルコクソンの符号順位検定を用いた分析によって、リーチングタスクに関しては、Flexible 条件においてレイアウトを変更することにより、Merged 条件より身体疲労を有意に軽減できていることが確認できた ($p < .01$, $r = .53$) (図 4 (a))。ドッキングタスクに関しては、レイアウトを変更することによって、精神的ストレス ($p < .01$, $r = .55$) と身体疲労 ($p < .01$, $r = .50$) の両方を有意に軽減することができていることが確認できた (図 4 (b))。インタビューより、特にピンチ操作によるサイズ調整時の身体への負担が軽減されたという意見が得られた。

3.4 観察された主要なレイアウト

(3) に関しては実験中に撮影したテーブルレイアウトの写真进行分类することで、どのレイアウトがどれくらいの割合で選ばれたのかを算出した。実際には、実験の内容を知らない外部のコーダー 8 名による分類作業を実施した。紙面の制約でその詳細は割愛するが、手順は写真とスケッチによる視覚的分类に基づくものである。その結果の概要を図 5 に示す。これらは、参加者によってデザインされた上位 3 つのレイアウトである。図中の赤丸は参加者の代表的な立ち位置を示す。リーチングタスクでは、19 カテゴリが観察されたうち、図 5 (上) に示す 3 つが多く選ばれ、これらを Merged, Slide, Single slide と呼ぶことにする。ドッ

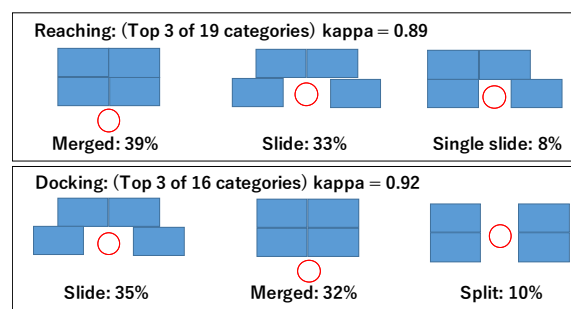


図 5 より好んで選ばれた上位 3 レイアウト:
上段リーチング、下段ドッキング

Figure 5 The three most preferred table layouts for reaching (top) and docking (bottom)

キングタスクでは、16 カテゴリが観察された中で図 5(下)に示す、Slide, Merged, Split の 3 つが多く選ばれた。中にはコーダーが分類に悩むレイアウトも観察されたが、最終的なコーダー間の一致度（クッパ係数）も、図中に示す通り十分に高くシンプルな結果が得られた。また、観察されたレイアウトの内、上位 3 つが全体の 8 割程度を占めていた。

3.5 議論

インタビューから、参加者はリーチ外の遠い位置にアクセスする時と、自分の利き手がある位置とは逆の位置で作業をしなければいけない時に、特にレイアウトの手動変形を試みたことが確認できた。ドッキングタスクに関して、Large シナリオも半数以上の参加者がレイアウトを変えたが、これは、ドッキングタスクの方が複雑な作業を必要としたために、レイアウトを変えるメリットがあると感じたからであると思われる。図 5 でも示したように、リーチングタスクとドッキングタスクでは、異なるレイアウトがまれに確認された。リーチングタスクでは、リーチングを簡単にするという点と同時に、ディスプレイ全体を見渡す必要があるため、視野に関しても注意を払った手動変形が行われた。ドッキングタスクに関して、参加者はドラッグ操作によるディスプレイ間の移動操作があるため、ディスプレイの結合を意識した手動変形がみられた。ディスプレイ間の移動操作があるときは、移動コンテンツが移動先のディスプレイ上に現れてから一度手を放し、移動先のディスプレイ側のコンテンツにタッチしてドラッグを再開した。従って、リーチングタスクとは違い 1 つのテーブルだけ動かすのではなく、Split のように前後に結合を保った状態での手動変形が多く選ばれたことが特徴である。また、リーチングタスクでは一人、ドッキングタスクでは二人が、全てのシナリオにおいて一度もレイアウトを変えることはなかった。理由として、リーチングタスクは視野、ドッキングタスクはディスプレイの分割を気にしたため、手動変形を行わなかったと回答した。

これらの結果から、参加者はリーチングとドッキングタスクの両方において、ある条件下でテーブルレイアウトを変えたいと思うことと、それが疲労軽減に有効であることが確認できた。しかし、手動でテーブルを変形させることは余計な身体疲労を生み出す。次章では、今回得られたレイアウトになるように自動変形可能なデジタルテーブルの実装について報告する。

4. 自動変形型デジタルテーブル

4.1 プロトタイピング

デザインスタディで使用した 4 台のテーブルをそれぞれモバイルロボット（Roomba（iRobot 社））の上に載せ、それぞれを別々に制御することで、テーブル面のレイアウトを変えることができるプロトタイプを実装した。前章の実験より、図 5 に示した Slide, Single slide（right と left）,

Split がより多く選ばれたため、これらの形に自動変形可能なように実装を行った。実際のテーブルの移動は、3m×2.5m の範囲全体を 16 台の外部の赤外線カメラを利用しトラッキングすることで安全性と正確性を十分に確保して制御されている。また、移動した後に元の形に戻る際のディスプレイ間の衝突による破損を防ぐため、緩衝材を取り付けた。また、ディスプレイの長辺に、一般的な収納棚等でも用いられているスライドレールを用いて結合することにより、安定して直線的にテーブルがスライドするようにした。なお、今回実装したプロトタイプは、安全性等を考慮し、自動変形コマンドを受け付けてから 2 秒後にレイアウト変形が完了する。テーブルの移動に二輪駆動機構を持つ Roomba を使用しているために移動方向に制限が生じているが、レイアウトデザインスタディによって得られた 4 種類への移動を実装する上では問題にならない。

4.2 レイアウトコントロールインタフェース

テーブルの移動を制御するユーザインタフェースとして、メニューを採用した。ディスプレイ上に表示されているボタンを押すと、その近くに図 1 中央上段に示すような、レイアウトデザインスタディで選ばれた 4 種のレイアウトが表示され、そのいずれかをタッチすることで選択したレイアウトに自動変形することが可能である。自動変形後は Merged の画像のみが表示されており、その画像をタッチすることで、レイアウトを Merged に戻すことができる。

このメニューインタフェースは予備的調査に基づき決定した。実際に参加者 6 名に簡単な実験を実施し、使いやすさの観点から評価した。メニュー以外のユーザインタフェースの候補として、ディスプレイタッチジェスチャと体と手の位置による制御を検討した。ディスプレイタッチジェスチャの場合は、今後、自動変形の自由度が増えた際に覚えることが難しいという意見があった。また身体の情報を利用する制御では、テーブルがいつ動き出すかわかりにくい、自分の意志とは別の形になることがあるという意見があった。結果として、どのようなレイアウトになるのか分かりやすいと高評価（参加者 6 名中 5 名が最高評価）を得たメニューを利用することとした。

5. 評価実験

従来手法として代表的なパンと比較して、ユーザに適切なリーチを与えることができたかを、タスク完了時間、身体疲労、精神的ストレス等の観点でプロトタイプシステム（自動変形可能なデジタルテーブル）を、評価した。

5.1 参加者

タッチディスプレイの操作に慣れている 20 名の大学生（男: 18 名、女: 2 名、平均年齢 22.2 歳、平均身長 171.7cm 右利き: 18 名、左利き: 2 名）が実験に参加した。

5.2 実験環境

前章で実装した自動変形型デジタルテーブルを使用した。

パンの条件では、4つのデジタルテーブルをマージした Merged レイアウトを用いた。実験ソフトウェアは Unity で作成し、タスクの順序やタスク完了時間の計測を管理した。

5.3 実験要因

本実験で扱う3つの要因について説明する。

5.3.1 インタクション手法

インタクション手法として、提案する自動変形型デジタルテーブルを用いる方法と、画面を二本指でドラッグすることで画面の遷移ができるパンを取り上げる。パンは最も一般的であり、2章で述べたように依然として強力なインタクション手法と考えられるからである。なお、自動変形型デジタルテーブルはメニューコマンドによって自動変形が開始し、1回の自動変形に要する時間は2秒程度である。今回はパンと共にズームを併用しなかった。これはディスプレイコンテンツを劇的に変えるために実験やタスクを複雑にするという理由からである。しかし、現実的な状況として今後検証する必要がある。

5.3.2 タスク

タスクは、レイアウトデザインスタディで用いたリーチングとドッキングを含み、かつ、実用アプリケーションにやや近いものを用いた。レイアウトデザインスタディから、参加者の多くは視覚探索も重視してテーブルを移動させていたことが確認できた。また、一般にデジタルテーブルは見る方向が異なるとコンテンツを正面から見づらくなる問題がある。そのため本実験では、視覚探索行動を必要としないフラッグタスクと、視覚探索行動を主に必要とするナンバータスクの2種類を用意した。いずれのタスクともリーチングとドッキングが必要である。フラッグタスクでは、世界地図上の10の国の位置に茶色の長方形が表示され、また、それ以外にも10枚の国旗の画像がランダムな位置に表示される。参加者は、正しい国の位置にある茶色の長方形にそれぞれの国旗を重ね合わせるタスクである。ナンバータスクは、白い背景上に数字を表す単語が書かれた茶色の長方形が10個表示される。加えて、同様にアラビア数字が書かれた赤いオブジェクトが10個表示されるので、それらを同じ数が書かれた長方形にドッキングするタスクである。両タスクでの、ターゲットの分布は、緑色と黄色のエリアがそれぞれ80%、20%となるように設定された。Large シナリオに関しては全体に配置された。

5.3.3 ターゲット分布シナリオ

レイアウトデザインスタディより、5つ (Large, Right vertical, Left vertical, Center vertical, および Far horizontal) のシナリオでレイアウトの変更を望むという結果が得られたため、本実験でもこの5つのシナリオを使用した。

5.4 実験デザイン

フラッグタスクとナンバータスクを5つのターゲット分布シナリオで行うことで、5×2の被験者内実験を実施した。独立変数はインタクション手法とシナリオで、従属変数

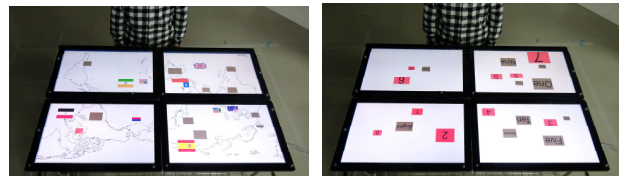


図6 フラッグタスク (左) とナンバータスク (右)

Figure 6 Flag task (left) and number task (right).

は、タスク完了時間とNASA-TLXとした2種類のタスク、5種類のシナリオ、2種類のインタクション手法はカウインターバランスがとられた。5つのシナリオでそれぞれ2回タスクを行ってもらったため、実験の総試行数は20名の参加者×2種類のタスク×5つのシナリオ×2つの手法×2回繰り返し=800試行であった。それぞれのシナリオでターゲットの位置は固定されていた。また実験を通して、タスクを身体に負荷のかかるような無理な姿勢で作業をすることを避けるように要求したので、参加者は必ず与えられたインタクション手法 (パンまたはデジタルテーブルの移動) を使用する必要があった。インタクション手法は、参加者が使いたい時に何回でも使用できた。

5.5 実験手順

図6 (左) はフラッグタスクを示している。ディスプレイ上に表示されている国旗をその国の位置にある茶色い長方形の位置に移動してサイズを合わせて重ね合わせるものであり、タッチ、ドラッグ、ピンチを使用する。タスク開始前に国旗とその国旗の該当する国の位置を確認し、国旗の移動場所を迷わないようにした。各国の茶色い長方形の位置とシナリオが対応しており、参加者はシナリオをタスク開始前に確認することができた。国旗の位置はランダムに全領域に等しく分布され、タスク開始前に確認ができた。それぞれのシナリオで、10個の国旗とターゲットが用意され、10個の国旗を対応する位置に重ね合わせるとそのシナリオ分のタスクが終了になる。各インタクション手法でタスクが終わる毎に、参加者はNASA-TLXに回答した。

図6 (右) はナンバータスクを示している。これは、アラビア数字が書かれた赤い長方形を同じ数を表す単語が書かれた茶色のオブジェクトに重ね合わせるタスクであり、これをタッチ、ドラッグ、ピンチを使用して行う。茶色の長方形の位置はタスク開始前に確認ができ、それらの位置はシナリオに対応していた。赤い長方形はタスク開始と同時に表示され、ランダムに全画面に均等に配置された。従って、フラッグタスクとは異なりタスク開始後、最初に参加者は目的の数を決め、それに対応する赤いオブジェクトを探し、その後茶色のオブジェクトに移動させる必要があった。それぞれのシナリオで、10個ずつの赤いオブジェクトと茶色のオブジェクトがそれぞれ用意され、全て重ね合わせるとそのシナリオ分のタスクが終了になる。フラッグタスク同様、ナンバータスクでもNASA-TLXに回答した。

タスクを始める前に、自動変形テーブル条件でのレイア

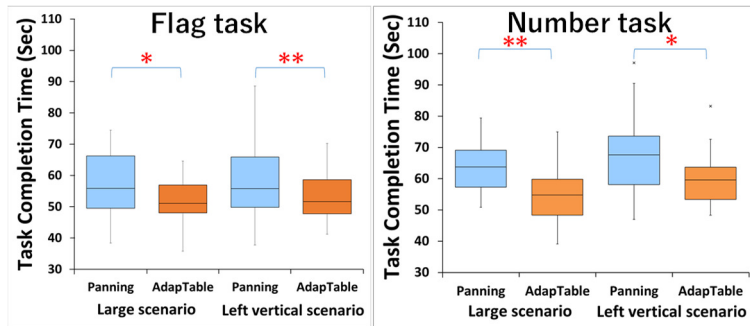


図 7 Large and Left vertical シナリオにおけるタスク完了時間。
左: フラッグタスク, 右: ナンバータスク

Figure 7 Task completion time in the Large and Left vertical scenarios
(left: flag task, right: number task)

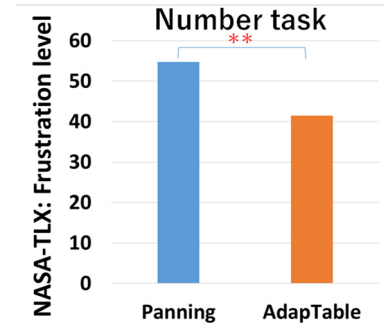


図 8 ナンバータスクにおける NASA-TLX の項目スコア

Figure 8 NASA-TLX for number task

ウトの変え方, パン条件でのコンテンツの移動のさせ方を実験者が入念に指示して十分な練習を行った。両タスクにおいて, ターゲットに重ね合わせた瞬間に, 重ね合わせたことがわかるようなサウンドフィードバックが設定された。すべてのタスクが終わった後に参加者は2つのインタラクティブ手法の長所と短所に関してインタビューを受けた。この実験は十分な休憩を含めて約2時間で終了した。

5.6 実験結果

得られた結果は正規分布に従わないため, 以降の検定はウィルコクソンの符号順位検定を用いた。本実験ではタスクを2回繰り返したが, 1回目は手法やタスクに慣れるための練習とみなして, 分析には2回目の結果のみを使用した。分析結果より, 図7に示すように, フラッグタスクの Large ($p < .05, r = .46$) と Left vertical ($p < .01, r = .62$) シナリオの時, またナンバータスクの Large ($p < .01, r = 0.79$) と Left vertical ($p < .05, r = 0.45$) シナリオの時に自動変形型デジタルテーブルの機能を使用することで, パンよりも有意に短い時間で作業を完了することができた。なお, このタスク完了時間には, テーブルの自動変形時間 (1変形あたり2秒) も含まれていた。1シナリオあたり, 1回または2回の移動が行われた。この理由は, 奥行き方向に作業分布が集中している時にパンを使用すると, 奥にアクセスする際に手前の領域が画面外に移動し, 無駄な前後運動が多くなったためだと考えられる。大局的な情報が必要な本タスクでは, パンの潜在的課題が現れたものと考えられる。

NASA-TLXの結果も分析した。ナンバータスクにおいて, 自動変形型デジタルテーブルを使用している時に Frustration level がパンより有意に小さくなるということが確認できた ($p < .01, r = .70$) (図8)。ナンバータスクは画面を見て目的の数を書かれたオブジェクトを探すことが必要なタスクであるので, 位置を覚える負荷がある中でパンを使って画面外にコンテンツを何度も戻して探すという行為がフラストレーションを溜めたと考えられる。それに対して自動変形型デジタルテーブルでは, 画面内にコンテンツが常に表示されるのでフラストレーションがより少なくな

ったと考える。フラッグタスクに関しては, 国旗をどこに移動すればよいかということが世界地図により即座にわかり, 探す行為が短時間で済むので自動変形型テーブルとパンで有意差はみられなかった。

この実験より, 提案する自動変形型デジタルテーブルでは, 利き手のある位置と逆の位置や遠い位置で作業をする時に, パンよりも有意に有効な手段であることが確認できた。また, ナンバータスクの時に自動変形型デジタルテーブルを利用することで, パンよりも精神的ストレスを軽減できることが確認できた。ただし, 主に作業する領域が横に広がるような状況下では, パンと比べてほぼ同様のパフォーマンスであった。

6. 議論

レイアウトデザインスタディにおいて, 利き手とは逆の位置あるいは遠くの位置にアクセスする必要がある時にテーブルを移動したいと思うことが確認できた。しかし, 評価実験に参加したのは20名中18名が右利きだったため, 利き手の違いによるバイアスについては考慮すべきである。

評価実験後のインタビューで, 実験で用いた手法それぞれに関しての長所と短所を調査した。自動変形デジタルテーブルの長所は, 自動変形をすることで今まで使用することができなかった領域も使用でき, ディスプレイ全面を活用することができるという意見があった。これに対して, パンで操作する場合はコンテンツを移動することによって遠くのコンテンツにアクセス可能になるが, 全面を使用できているわけではなく, 手前の2枚を使用してコンテンツを操作していることに変わりはないという意見があった。自動変形型デジタルテーブルの短所としては, ユーザーは自動変形が完了するのを待つ必要があるため, その時間が退屈だという意見があった。2秒という移動時間は十分に短い設定と考えるが, この意見に対しては, 今後, 安全性等を考慮して, Roombaの移動速度を変更する等して対応する。また, テーブルを移動することによりコンテンツが分離することになるため, 世界地図のような一般的に知られ

た事柄を使用する環境ではない場合には問題になる可能性があるという意見があった。

7. 本研究の限界と今後の展望

提案する方法では、テーブルの移動によりコンテンツを分離してしまうので、視覚的負荷が高いリーディング等のタスクには向いていない[21]。また、現状のプロトタイプでは、ディスプレイのベゼル[2]と自動変形の自由度に関する限界がある。今回は市販のタッチディスプレイを組み合わせでデジタルテーブルを構築したが、これらのベゼルによる影響は当然考えられる。慣れればベゼルの存在は操作に強く影響しないという意見もあったが、スムーズなドラッグ操作のためにはベゼルが狭いディスプレイを活用することが望ましい。また今後、移動自由度を増やすことを考えた場合には、Roombaの運動性能では不十分で、全方位移動ロボットの導入等も考える必要があるだろう。また、今回は大局的な情報を必要とするタスクに限定してその有効性を見出したが今後は、より実際に近い実験や複数人への対応等をしてゆく必要がある。今回は、LargeとLeft verticalの条件でのみ効果が得られたが、より大きなデジタルテーブルを利用する時は、より大きな効果が予想される。

8. まとめ

本研究では、大型デジタルテーブル利用時に、ユーザの操作可能範囲（リーチ）を拡張することを考え、自動変形可能なタイル型のデジタルテーブルを検討した。複数のテーブルをタイル状に配置して大きなデジタルテーブルを構成し、それぞれの位置をモバイルロボットによって制御することで、テーブル面の形状を自動変形させる。テーブル面の一部を分割させれば、ユーザはそれによって生まれた空間（テーブルの内部）に入ることができるため、テーブルの端のコンテンツも自然な姿勢で操作することができる。本研究では、複数の小型デジタルテーブルを連携利用した場合に、ユーザはどのようなレイアウトを好むかをデザインスタディにより調査し、主要な5つのレイアウトを見出した。その結果を元にプロトタイプを実装し、その評価実験において、代表的なインタフェースであるパンと比較して、いくつかの条件で有意に早く低負荷なインタラクションができることを確認した。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 17K00262 および Wallenberg Autonomous Systems and Software Program による。

参考文献

- [1]. M. Czerwinski, G. Robertson, B. Meyers, G. Smith, D. Robbins, and D. Tan, Large display research overview. *ExCHI '06*, 69-74.
- [2]. X. Bi, S.-H. Bae, and R. Balakrishnan, Effects of interior bezels of tiled-monitor large displays on visual search, tunnel steering, and target selection. *CHI '10*, 65-74.
- [3]. A. Endert, L. Bradel, J. Zeitz, C. Andrews, and C. North, Designing large high-resolution display workspaces. *AVI '12*, 58-65.
- [4]. C. Forlines, D. Vogel, and R. Balakrishnan, HybridPointing: fluid switching between absolute and relative pointing with a direct input device. *UIST '06*, 211-220.
- [5]. C. Gutwin and C. Fedak, Interacting with big interfaces on small screens: a comparison of fisheye, zoom, and panning techniques. *GI '04*, 145-152.
- [6]. M. Abednego, J. -H. Lee, W. Moon, and J.-H. Park, I-Grabber: expanding physical reach in a large-display tabletop environment through the use of a virtual grabber. *ITS '09*, 61-64.
- [7]. T. Kuribara, Y. Mita, K. Onishi, B. Shizuki, and J. Tanaka, HandyScope: A remote control technique using circular widget on tabletops. *HCI International*, LNCS 8511, 69-80, 2014.
- [8]. S. Voelker, M. Weiss, C. Wacharamanotham, and J. Borchers, Dynamic Portals: a lightweight metaphor for fast object transfer on interactive surfaces. *ITS '11*, 158-161.
- [9]. N. Tochihara, T. Sato, and H. Koike, A remote pointing method with dynamic C-D ratio during a pinching gesture for large tabletop system. *ExCHI*, 553-559.
- [10]. K. Pfeuffer, J. Alexander, M. K. Chong, and H. Gellersen, Gaze-touch: combining gaze with multi-touch for interaction on the same surface. *UIST '14*, 509-518.
- [11]. L. Lischke, S. Mayer, K. Wolf, N. Henze, H. Reiterer, and A. Schmidt, Screen arrangements and interaction areas for large display work places. *PerDis '16*, 228-234.
- [12]. P. Tandler, T. Prante, C. Müller-Tomfelde, N. Streitz, and R. Steinmetz, ConnecTables: dynamic coupling of displays for the flexible creation of shared workspaces. *UIST '01*, 11-20.
- [13]. P. Bader, V. Schwind, N. Pohl, N. Henze, K. Wolf, S. Schneegass, and A. Schmidt, Self-actuated displays for vertical surfaces, *INTERACT '15*, 282-299.
- [14]. G. Bailly, S. Sahdev, S. Malacria, and T. Pietrzak, LivingDesktop: augmenting desktop workstation with actuated devices. *CHI '16*, 5298-5310.
- [15]. K. Takashima, T. Oyama, Y. Asari, E. Sharlin, S. Greenberg, and Y. Kitamura, Study and design of a shape-shifting wall display. *DIS '16*, 796-806.
- [16]. N. Isoyama, T. Terada, and M. Tsukamoto, Multi-tiles: a system for information presentation using divided rotatable screens. *Adv. Mob. Comput. Multimed.*, 14-18.
- [17]. K. Takashima, Y. Asari, H. Yokoyama, E. Sharlin, and Y. Kitamura, Movementable: The design of moving interactive tabletops, *INTERACT '15*, 296-314.
- [18]. K. Takashima, N. Aida, H. Yokoyama, and Y. Kitamura, TransformTable: a self-actuated shape-changing digital table. *ITS '13*, 179-188.
- [19]. J. E. Grønbaek, H. Korsgaard, M. G. Petersen, M. H. Birk, and P. G. Krogh, Proxemic Transitions: designing shape-changing furniture for informal meetings. *CHI '17*, 7029-7041.
- [20]. "ideum". <https://www.ideum.com/products/touch-tables/pro>
- [21]. D. Tan and M. Czerwinski, Effects of visual separation and physical discontinuities when distributing information across multiple displays. *OZCHI '03*, 184-191.
- [22]. Y. Qin, J. Liu, C. Wu, and Y. Shi, uEmergency: a collaborative system for emergency management on very large tabletop. *ITS '12*, 399-402.
- [23]. Y. Qin, C. Yu, J. Liu, Y. Wang, Y. Shi, Z. Su, and Y. Shi, uTable: a seamlessly tiled, very large interactive tabletop system. *ITS '11*, 244-245.
- [24]. A. Toney and B. H. Thomas, Applying reach in direct manipulation user interfaces. *OZCHI '06*, 393-396.
- [25]. A. Banerjee, J. Burstyn, A. Girouard, and R. Vertegaal, Pointable: an in-air pointing technique to manipulate out-of-reach targets on tabletops. *ITS '11*, 11-20.
- [26]. "ERGOTRON". <https://www.ergotron.com/tools/workspace-planner>
- [27]. G. Shoemaker, T. Tsukitani, Y. Kitamura, and K. S. Booth, Body-centric interaction techniques for very large wall displays. *NordiCHI '10*, 463-472.