

自動レイアウト変更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^{1,a)} 高嶋 和毅¹ モルテン フィールド² 北村 喜文¹

受付日 2018年12月20日, 採録日 2019年7月3日

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, 自動レイアウト変更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を自動的に変形させる. たとえば, テーブルを分割させれば, 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, ディスプレイ情報を (分割するが) 維持したまま, ユーザのリーチを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同時利用した場合, 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, 提案する自動レイアウト変更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.

キーワード: インタラクティブデジタルテーブル, 変形ディスプレイ, ロボティックディスプレイ, タッチインタラクション

Extending Reach over Large Tabletops through Flexible Multi-display Configuration

YOSHIKI KUDO^{1,a)} KAZUKI TAKASHIMA¹ MORTEN FJELD² YOSHIFUMI KITAMURA¹

Received: December 20, 2018, Accepted: July 3, 2019

Abstract: Large interactive tabletops are beneficial for various tasks involving exploration and visualization, but regions of the screen far from users can be difficult to reach. We propose a concept and prototype of a flexible multi-display tabletop that can physically reconfigure its layout, allowing for interaction with difficult-to-reach regions. We conducted a design study where we found users preferred to change screen layouts for full-screen interaction, motivated by reduced physical demands and frustration. We then prototyped flexible multi-display tabletop using four actuated tabletop displays each propelled by a mobile robot, and a touch menu was chosen to control the layout. Finally, we conducted a user study to evaluate how well the prototype addresses the reaching problem compared with a conventional panning technique. Our findings show that the prototype provides a more efficient method for complex full-screen interaction.

Keywords: interactive digital surface display, shape-changing and actuated surfaces, touch interaction

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, より多くの書類や物

本論文の内容は 2018 年の INTERACTION で報告された論文である.

©ACM 2018. This is a minor revision of the work published in Proc. ISS 2018. <https://doi.org/10.1145/3279778.3279779>

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 チャルマース工科大学
t2i lab, CSE, Chalmers University of Technology, Göteborg, Västra Götaland SE41296, Sweden

^{a)} ykudo@riec.tohoku.ac.jp

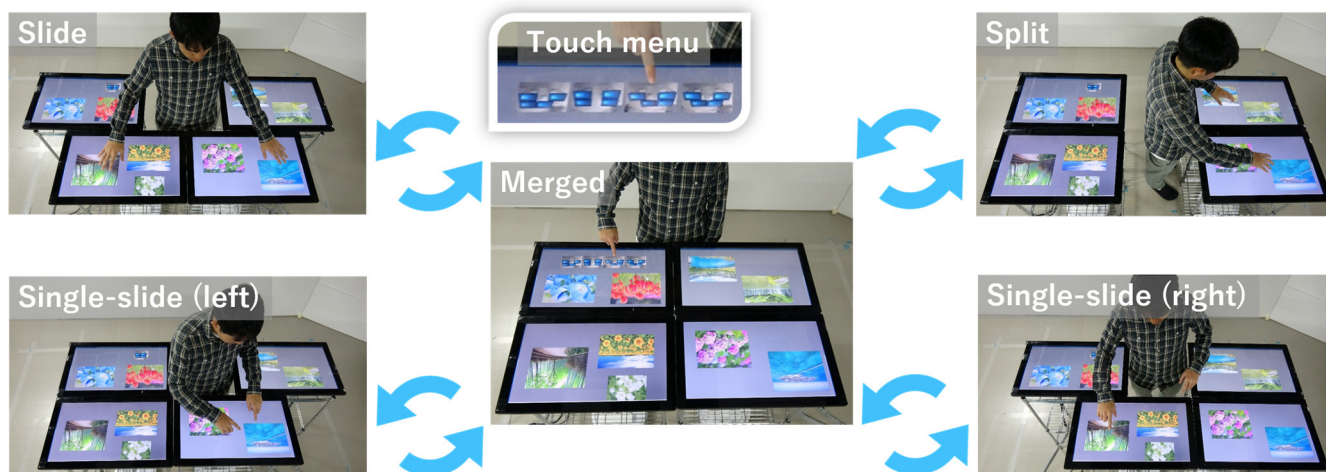


図 1 4 台のデジタルテーブルの連携による大型デジタルテーブルのレイアウト変更および状態遷移の様子

Fig. 1 With its four horizontal screens, the tabletop system offers flexible multi-display configuration.

を作業面に並べることができるため、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。すでに市場には様々なデジタルテーブルが登場しており、50 インチ程度のデジタルテーブルが多いが、なかには 100 インチを超える大型のシステムもある（たとえば、文献 [22], [23]）。このような大型デジタルテーブルの作業面は、複数人を想定していることが多いが、単独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、導入が進むと期待されている。しかし、広いテーブル面全体に対してタッチ入力やスクーリング等の複雑な操作をする場合、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 34 cm 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回って対象の領域まで歩いてゆく必要があった。これは、ユーザの身体的な腕の長さ（リーチ）やと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、パン（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 [5]。これは、広く利用されているが、ディスプレイ上のコンテンツ間の位置

関係等、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画面の往復移動が多発する等、課題も多い。その他の方法として、カーソルやジェスチャを利用して遠くのコンテンツに対する選択（たとえば、クリック）や移動といった単純な操作をさせる方法 [6], [7], [9], [25] も提案されているが、ズーム等の繊細な操作をすることは難しいという基本的な課題がある。したがって、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コンテンツの大局的な情報を失わずに、テーブル面全体での操作領域（リーチ）をユーザに与える方法は、大型のデジタルテーブルを効率的に利用するうえで有益であるが、これまでのところ考案されていない。

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、自動的にレイアウトを変更できるタイル型のデジタルテーブルを新たに検討する。モバイルロボットによる移動の機能を持つ小型デジタルテーブルを 4 台組み合わせて大きなテーブル面を構成する。そして、作業等の状況やユーザの明示的な入力に応じて、それらのデジタルテーブルはそれぞれモバイルロボットの移動機能を用いて、状況やユーザの入力に応じてそれぞれの配置を変えることで、全体としてのテーブル面の形状を変化させることができる。たとえば、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、手前の 2 つのディスプレイを分割し、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、テーブルが自動で移動してユーザが利用可能な空間を増やすことで、ユーザのリーチ操作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、コンテンツはすべ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、コンテンツが外部に移動するパン等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、ただちに元のレイアウトや別の異なるレイアウトに自動的に遷移することができる。このように、本研究では、従来は静的であったテーブル面のレイアウトを自動的に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、効率的かつ低負荷なインタラクションを実現する。

2. 関連研究

本章では、デジタルテーブルの背景に加え、壁面ディスプレイ等、人のリーチの範囲を超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は古くから指摘され [1], 様々な解決方法が提案されてきた (たとえば, 文献 [1], [4], [27]). 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, 大きな画面遷移や情報表示の歪みをとまなうため, 大局的な情報を把握しにくくする。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。たとえば 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ルリング等, より複雑な操作が可能である [7]. 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ものの, 視線追跡装置の計測範囲が小さいという課題がある。

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るのは HandyScope [7] と Pointable [25] である。しかし, これらは選択タスクにおいて有効であるが, スケールリング等の複雑な操作には, 直接のタッチ操作と差がないと報告されている [7], [25]. 以上のように, 多くのリーチ拡張手法が提案されているが, 選択や移動だけではなく, スケールリング等も含めた一般的な操作群を考えた場合, 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, パンは多くの場面において簡単で有効である反面, 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 [29]. 本研究では新たなアプローチとして, 単一のデジタルテーブル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, 状況に応じて物理的な空間を確保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上でのタッチ操作は効果的ではないため, ディスプレイの形状や配置に関する研究はさかんになされている。たとえば, ユーザを取り囲む広大なタイル型ディスプレイの曲率とユーザの作業効率の関連を調べた研究等がある [3]. そのほか, 様々なディスプレイ配置の効果を調べ, いくつかの有望な配置を推薦する研究もある [11]. この研究では鉛直ディスプレイが使われているが, タッチが必要ときにはユーザはその到達性を改善できるレイアウトを好むことが示されている。これは本研究の動機にも関わる報告である。そのほか, 複数のディスプレイを状況に応じて, 手動で移動して組み合わせるものもある。たとえば, ConnecTable は, 1 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]. しかし, 手動で構成を変更するため, ユーザの負荷や移動精度について課題がある。本研究では, 自動移動機構を導入してユーザの負荷なし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。たとえば, 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例もある [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, 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 [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。MovemenTable [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、長方形のいずれかにテーブルの形を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ことが報告されている [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、より良い作業空間を提供する方法についての研究はさかんになされており、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が関係するリーチの課題を、ディスプレイの形状の変化を通して解決しようとした研究はない。本研究では、自動レイアウト変更可能なディスプレイの検討を進めるが、まず、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知る必要がある。次章ではこの点について報告する。

3. レイアウトデザインスタディ

本研究では、複数の小型のデジタルテーブルを連携利用することで、広大な作業平面を提供しながらも、ユーザにとって快適な形状のテーブル面を提供するシステムの構築を目指す。これに向けて、デジタルテーブルにおけるレイアウトに関する設計指針を得るためのデザインスタディを実施した。ここでは、(1) どのようなときに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、の3点を検証した。

3.1 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をあわせた大型の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種類のタスクを、7つのターゲット分布シナリオで実施した。また、それらを実施するにあたり、14名の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についてのアンケートとインタビューに回答した。

3.1.1 参加者

タッチディスプレイの操作に慣れている14名の大学生(男:13名, 女:1名, 平均年齢22.3歳, 平均身長172.8cm, 右利き:11名, 左利き:3名)が実験に参加した。

3.1.2 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台組み合わせて構成した。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ケーブルでつながれており、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、現在一般的に使用されている大型のデジタルテーブル(たとえば、55 inch MS Hub や ideum Pro [20])と同等である。テーブル上面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、実験参加者の平均身長を基準に106 cm 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つね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ときに、50 インチ程度が1人で利用する場合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と考えられることから、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に相当する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。そのような大型テーブルでは、複数人利用を含めた別の検証が必要であると考ええる。実験ソフトウェアはUnityで作成した。実験中は、参加者の姿を側面と頭上にビデオカメラを設置して実験の様子を記録した。

3.1.3 タスクデザインとターゲット分布シナリオ

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ため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(図2)。シナリオは、ターゲットが

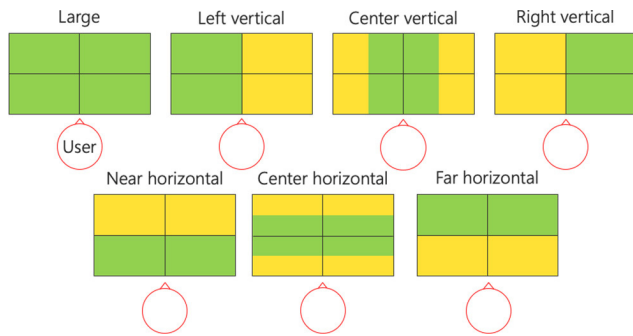


図 2 7つのターゲット分布シナリオ（緑色：インタラクション回数多い，黄色：インタラクション回数少ない）

Fig. 2 Seven target distribution scenarios as seen from the user's perspective (red circle). Green areas indicate more interaction while yellow areas show less interaction.

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）の分布からなり，次のようにシナリオを設定した．

- Large（全領域でターゲットと操作が発生）
- Left vertical（左側縦方向にターゲットと操作が集中）
- Right vertical（右側縦方向にターゲットと操作が集中）
- Center vertical（中央縦方向にターゲットと操作が集中）
- Near horizontal（手前横方向にターゲットと操作が集中）
- Center horizontal（中央横方向にターゲットと操作が集中）
- Far horizontal（奥側横方向にターゲットと操作が集中）

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な状態とし，一方の黄色の領域では移動オブジェクトのサイズ調整が不要な条件とした．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．

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ていく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（たとえば，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作業が必要な領域（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．

3.1.4 実験デザイン

3.1.2項で述べた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）を設け，MergedとFlexibleの順で実施した．これは，Mergedでの経験をふまえて，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である．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更回数を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．したがって，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回繰返し=392である．すべ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すべて入念な予備的調査結果に基づいて決定されている．

3.1.5 実験手順

図3(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，ランダムに出現する赤い正方形のターゲット（1辺2cm）をタッチしていく（図3(b)）．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．この試行が各々のシナリオごとに30回繰返し実施された．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（無理な姿勢をせず）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．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よいという

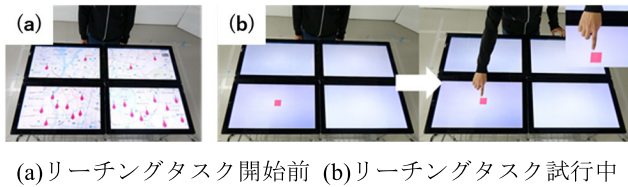


図 3 リーチングタスク

Fig. 3 Reaching task. (a) Initial view of reaching task, (b) Reaching task sequence.

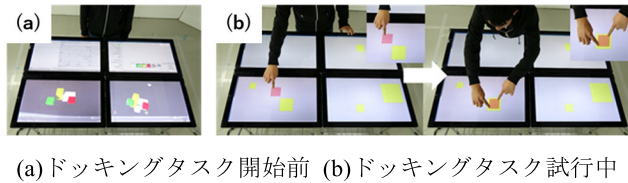


図 4 ドッキングタスク

Fig. 4 Docking task. (a) Initial view of docking task, (b) Docking task sequence.

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たびに、身体疲労と精神的ストレスに関する 5 段階評価のアンケートに答えた。

図 4(a) と (b) 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 4(a))。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 4(b) 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 (1 辺 7 cm) を移動し、6 つの黄色い正方形のオブジェクト (ターゲットに相当) (小 $\times 2$ (1 辺 4.5 cm, 5.5 cm), 中 $\times 2$ (1 辺 7 cm), 大 $\times 2$ (1 辺 9 cm, 15 cm)) 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 (片手 2 本, 両手 1 本ずつどちらでも可) 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あらかじ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 条件の後に Flexible 条件を実施した。なお、ドッキングタスクでは、オブジェクトはすべ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。各々のシナリオごとに、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に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、あるいはレイアウトを変えたことによってできた空間に立って実施した。実験で設定したシナリオは

ユーザがテーブル正面に立っているときを基準として設定したためこのような決まりとした。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、レイアウトを変更しようと思ったときであると判定した。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とき (奥行方向のリーチング作業が多いとき等) に、多くの参加者がレイアウトを変更した。

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) のデータを用いた。

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 5 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 Merged 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 5 (左))。また、同図に示すように、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たことが確認できた (図 5 (右))。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

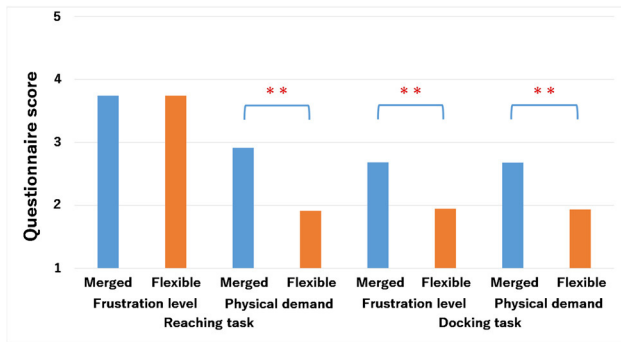


図 5 アンケート結果

Fig. 5 Questionnaire results (1 = low, 5 = high).

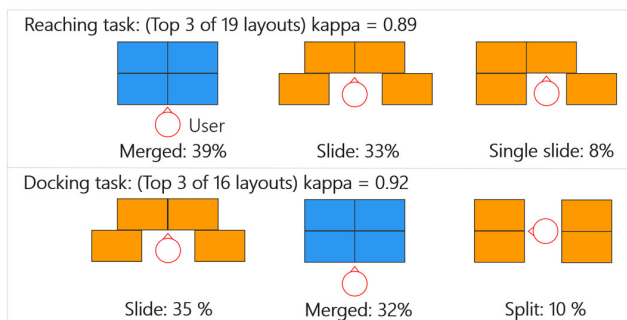


図 6 より好んで選ばれた上位 3 レイアウト (上段：リーチング，下段：ドッキング)

Fig. 6 Three most preferred layouts for reaching/docking tasks.

の写真を分類することで、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 8 名による分類作業を実施した。はじめに、何グループのレイアウトが得られたかを確認するために、実験で得られたレイアウト（各タスク 140 ずつ）のグループ分けを 4 名のコーダがタスクごとに行った。その後、グループ分けを行ったコーダとは別の 4 名が作成されたグループのどれに実験で得られたレイアウトが属するかの分類をタスクごとに行った。最後に、各グループに分類されたレイアウトの数で選ばれたレイアウトの割合を実験者が計算した。

その結果の概要を図 6 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 6 の上段に示す 3 つが多く選ばれ、これらを Merged, Slide, Single slide と呼ぶことにする。ドッキングタスクでは、16 カテゴリが観察された中で図 6 の下段に示す Slide, Merged, Split の 3 つが多く選ばれた。なかにはコーダが分類に悩むレイアウトも観察されたが、最終的なコーダ間の一致度（カッパ係数）も、図中に示すとお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うち、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とき、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ならないときに、特にレイアウトの変更をし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利点が大きかったからである。図 6 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稀に確認された。リーチングタスクでは、リーチングを簡単にするということと同時に、ディスプレイ全体を見渡す必要があるので、視野に関しても注意を払ったレイアウトが好まれた。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レイアウトの変更が見られた。ディスプレイ間をまたぐオブジェクト移動の操作があるときは、移動させるコンテンツが移動先のディスプレイ上に現れてから 1 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。したがって、リーチングタスクとは異なり 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レイアウト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 1 名、ドッキングタスクでは 2 名が、すべてのシナリオにおいて 1 度もレイアウトを変えることはなかった。それらの参加者は、その理由として、リーチングタスクではテーブルを移動させることによりテーブルが参加者の視野外に配置されること、ドッキングタスクではディスプレイの分割によりコンテンツ間にギャップが生まれることを避けたため、レイアウトを変更し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、ユーザが手動でテーブルを移動させたり綺麗に整列させたりすることは、大きな身体負担が発生する。そのため、ユーザの快適な作業を維持するためには、本実験により得られた効果的なレイアウトにデジタルテーブルが何らかのコマンドにより自動で変形することが好ましいと考えられる。次章では、今回得られたレイアウトに自動的に変形することが可能なデジタルテーブルの実装について報告する。

4. 自動レイアウト変更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 (図 7)。前

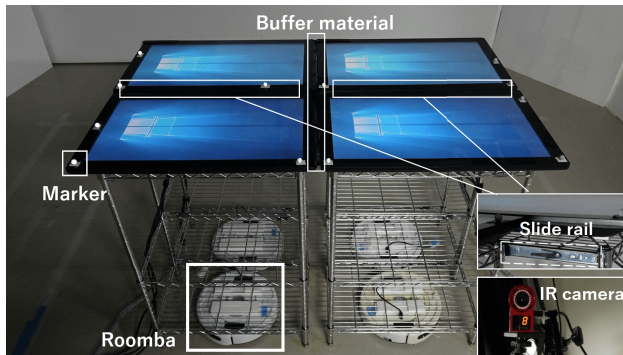


図 7 プロトタイプ構成

Fig. 7 Key elements of the prototype.

章の実験より、図 6 に示した Slide, Single slide (right と left), Split がより多く選ばれたため、これらのレイアウトに自動変更可能なように実装した。実際のテーブルの移動は、 $3\text{m} \times 2.5\text{m}$ の範囲全体を 16 台の外部の赤外線カメラを利用して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。さらに、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、実装したプロトタイプは、安全性等を考慮し、自動レイアウト変更コマンドを受け付けてから 2 秒後にレイアウト変更が完了するようにモバイルロボットの移動速度を調整した。

4.2 レイアウト制御インタフェース

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、ディスプレイタッチジェスチャ、体と手の位置による制御を実装した (図 8)。メニューとディスプレイタッチジェスチャは、ディスプレイに対してユーザが入力することでテーブルを移動させるのに対して、体と手の位置による制御は、システムがユーザの体と手の位置を計測し、それに応じてテーブルを自動的に移動させる。

メニュー：ディスプレイに表示されているボタンを押すと、図 1 中央上段に示す 4 種のレイアウトを示すアイコンが表示され、そのいずれかをタッチすると選択したレイアウトに自動変更することができる。変更後は Merged の画像のみが表示されており、それをタッチすれば Merged に戻ることができる。

ディスプレイタッチジェスチャ：いずれかのディスプレイ上で、指をスワイプさせることでテーブルを動かすことができる。1 本の指をスワイプすると 1 台のテーブルが移動し、2 本の指でスワイプをすると 2 台のテーブルが移動する。また右にスワイプすると右側のテーブルが動き、左にスワイプすると左側のテーブルが移動する。変更後いずれかのディスプレイ上に 5 本の指を置くとレイアウトを

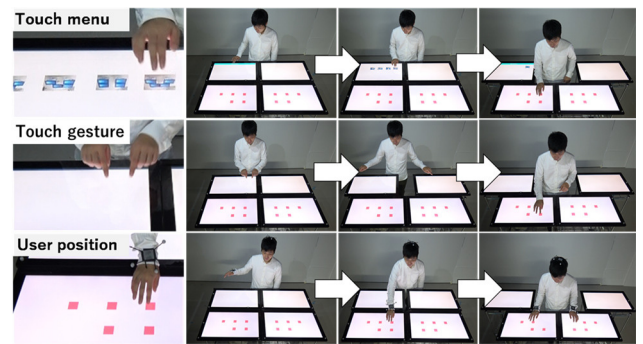


図 8 レイアウトコントロールインタフェース (メニュー、ディスプレイタッチジェスチャ、体と手の位置による制御)

Fig. 8 Layout control interfaces (touch menu, touch gesture, user position).

Merged に戻ることができる。

体と手の位置による制御：システムがユーザの体の位置と手の位置から判断してテーブルを自動的に移動させる。手の位置がテーブルを移動させるトリガとなっており、奥のディスプレイ上に手がある場合はユーザがそのとき立っている位置の手前にあるテーブルが移動する。移動後、ユーザがテーブルの外側に戻るとシステムがレイアウトを Merged に戻す。

上の 3 つのインタフェースはいずれも長所と短所を持つものであり、状況により使い分けることが好ましい。しかし、次章で取り組む評価実験で使用するインタフェースを決めるために予備的調査を行った。参加者 6 名に 3 つのインタフェースを実際に使用してもらい、評価した。メニューは画像からレイアウトを選ぶだけという単純さと、表示されている画像からどのレイアウトに変更するかがすぐに分かるため、操作するために何も覚えなくてよいという点で評価が高かった。それに対してディスプレイタッチジェスチャの場合は、直感的に操作できる点は評価されたが、1 つのレイアウトに対して 1 つのジェスチャが対応しているため、今後さらに変更できるレイアウトが増えた際に覚えることが難しいという意見があった。また身体的位置情報を利用する制御では、テーブルがいつ動き出すか分かりにくいという意見があった。結果として、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

本提案手法がユーザに適切なリーチを与えることができ、快適な作業環境を構築することができたかを、タスク完了時間と負荷量 (NASA-TLX) の観点で従来手法であるパンと比較して評価した。

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レイアウト変更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 インタラクション手法

インタラクション手法として，提案する自動レイアウト変更型デジタルテーブルを用いる方法と，画面を2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ラクション手法と考えられるからである。パンを用いることで，参加者は画面上で指を動かした(ドラッグした)方向に画面の遷移を行うことができた。また，慣性が効いていたため，指を画面から離れた後も，指の速さに応じて少し移動してから遷移が止まるように設定した。また，今回用いているコンテンツの大きさはデジタルテーブルの大きさと同様であり，スクロールバーが必要となるほどの画面遷移をさせないタスクであるため利用しなかった。なお，自動レイアウト変更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更が開始し，1回の變更に要する時間は2秒程度である。複雑さを避けるために，今回はパンと併用されることが多いズームは検証しなかった。

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では，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にくくなるという問題がある。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。ナンバータスクは，白い背景上に数字を表す英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。参加者は，

アラビア数字と英単語で書かれた数がマッチするように，アラビア数字が書かれた赤いオブジェクトを，同じ数を表す英単語が書かれた茶色の長方形にドッキングする。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で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。独立変数はインタラクション手法とシナリオで，従属変数は，タスク完了時間とNASA-TLXとした。20名の実験参加者間で，2種類のタスク，5種類のシナリオ，そして，2種類のインタラクション手法のカウンタバランスをとった。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 $\times$ 2種類のタスク $\times$ 5つのシナリオ $\times$ 2つの手法 $\times$ 2回繰返し $=800$ 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ラクション手法(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。インタラクション手法は，参加者が使いたいときに何回でも使用できた。

5.5 実験手順

図9(上)はフラッグタスクの様子を示している。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あ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実験者が参加者に説明し，国旗が分からないという理由で移動場所に迷わないようにした。各国の茶色い長方形の位置がシナリオに対応しているため，参加者はタスク開始前に長方形の分布からシナリオの大枠を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，その10個の国旗を対応する位置(国)に移動し，ターゲットの茶色い長方形に重ね合わせるとそのシナリオ分のタスクが終了となる。各インタラクション手法で，タスクが終わるごとに，参加者はNASA-TLXに回答した。

図9(下)はナンバータスクの様子を示している。これ

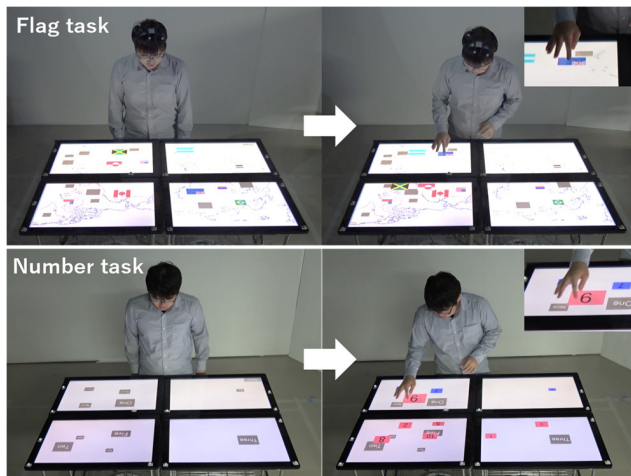


図 9 フラッグタスク (上) とナンバータスク (下)

Fig. 9 Flag task (top) and number task (bottom).

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長方形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、それらの位置が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。したがって、フラッグタスクとは異なり、タスク開始後、参加者は、移動させる赤い長方形を選びそれに対応する茶色の長方形にその赤い長方形を移動させる、あるいは目標の茶色の長方形を選びそれに対応する赤い長方形を探し、その後茶色の長方形に移動させる必要があった。それぞれのシナリオで、10 個ずつの赤い長方形と茶色の長方形がそれぞれ用意され、すべ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、自動レイアウト変更型テーブル条件でのレイアウトの変更方法、パン条件でのコンテンツの移動方法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、国旗等をターゲットに重ね合わせた事実が明確に分かるようにサウンドフィードバックを設定した。すべてのタスクが終わった後に、参加者は 2 つのインタラクション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

取得し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見なして、分析には 2 回目の結果のみを使用した。分析結果より、図 10 に示すように、フラッグタスクの Large ($p < .05$, $r = .46$) と Left vertical ($p < .01$, $r = .62$) シナリオのとき、またナンバータスクの Large ($p < .01$, $r = .79$) と Left vertical ($p < .05$, $r = .45$) シ

ナリオのときに自動レイアウト変更型デジタルテーブルの方がパンよりも有意に短い時間でタスクを完了することができた。なお、このタスク完了時間には、テーブルの自動変更時間 (1 変更あたり 2 秒) も含まれており、1 シナリオあたり、1 回または 2 回の移動が行われた。自動変更がより速いタスク完了を導いた理由は、奥行き方向に作業分布が集中しているとき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する。

NASA-TLX の分析結果からは、ナンバータスクにおいて、自動変更型デジタルテーブルを使用しているときに Frustration level がパンよりも有意に小さくなるということが確認できた ($p < .01$, $r = .70$) (図 11)。ナンバータスクは画面を見て目的の数が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、位置を記憶する負荷がある中で、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更型デジタルテーブルでは、画面内にコンテンツがつね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分かり、探す行為が短時間で済むので、自動変更型テーブルとパンで有意差は見られなかった。

評価実験後のインタビューで、自動レイアウト変更型デジタルテーブルとパンの長所と短所を調査した。長所は、自動的にテーブルのレイアウトが変わるため、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ことである。パンでは、直感的にコンテンツをスライドさせて遠くのコンテンツを手元に置くことはできるが、ディスプレイ全面を使用できているわけではなく、手前の 2 つのディスプレイ面しか触っていない。自動レイアウト変更型デジタルテーブルの短所としては、ユーザは自動変更が完了するのを待つ必要があるため、その時間を長く感じたという意見が 1 名から得られた。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、安全面を確保しながらもユーザの好みに応じて変形速度を変えられるように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、世界地図のような既知の事柄を使用しない環境では問題になる可能性があるという意見があった。

この実験より、提案する自動レイアウト変更型デジタルテーブルは、利き手に対して逆方向にある位置や遠い位置で作業をするときに、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、ナンバータスクのときに自動レイアウト変更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、作業する領域が左右に広がるような状況下 (例: Far

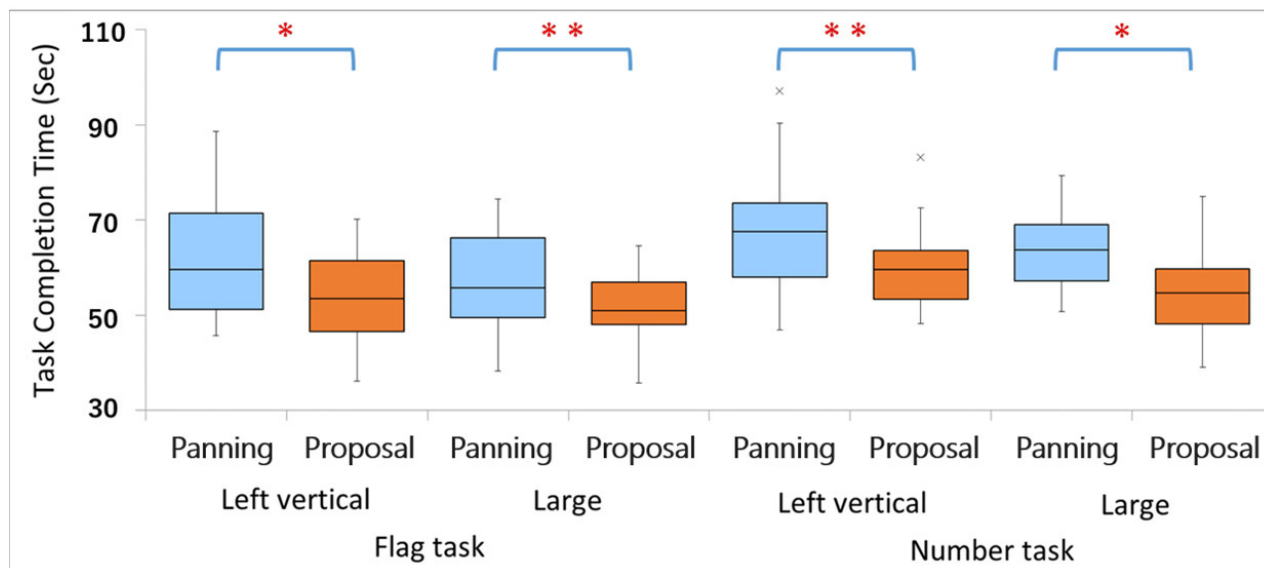


図 10 Large and Left vertical シナリオにおけるタスク完了時間 (左：フラッグタスク, 右：ナンバータスク)

Fig. 10 Task completion time for flag and number task.

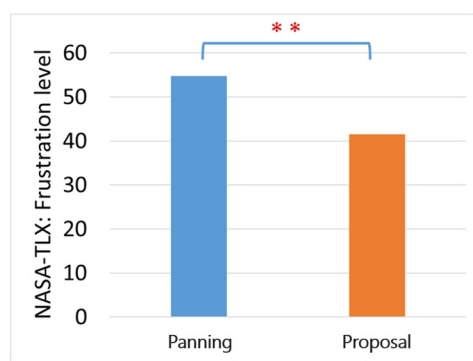


図 11 ナンバータスクにおける NASA-TLX の項目スコア

Fig. 11 NASA-TLX for number task.

horizontal シナリオ等) 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

6.1 個人への最適化

デスクトップ環境下でのディスプレイ配置に関して調査した従来研究 [11] と同様に、我々のレイアウトデザインスタディにおいても、ほとんどの参加者がディスプレイの配置を変えてタスクを遂行した。本研究ではユーザがより好んで選んだ4つのレイアウトに変更可能なシステムを実装し、それが作業負担を少なくし、また効率的な作業空間を提供できることが分かった。しかし本実験では、同程度の身長参加者による結果を報告している。人は様々な身体的特徴や好みを持つため、それらを吸収しより強力なディスプレイシステムに発展するには、パーソナライゼーションやより多くの変形自由度（高さ可変等）等、追加の要素を今後検証していく必要があると考える。

6.2 レイアウト

自動的にレイアウトを変更することでテーブル面全体にリーチを与え、ユーザの身体および精神負担を低下させ、かつ効率的な作業を導いたことを確認できた。リーチを拡張するだけであれば、たとえばテーブルのレイアウトを図 6 中の Slide に固定設置するだけでも効果はあるかもしれない。しかし、デザインスタディからも判明しているように、ユーザはレイアウト変形の際にコンテンツ間のギャップや視野等を考慮した多様な変形を好む。またコンテンツのつながりが重要なタスクの場合には、図 6 中の Merged のまま作業を行うのがよいときもあり、状況に応じて最も適合する作業環境を柔軟に提供できることが望ましい。本提案はその課題の解決の一例を示したと考える。

本研究では4台のデジタルテーブルをタイル型に配置して大型デジタルテーブルを柔軟に構成する方法について検討してきた。同サイズのディスプレイをタイルとして利用することで変形の粒度は低くなるが、機構が単純であり実装面で優れ、また、運用や拡張性についても大きな期待が持てる。たとえば、図 12 に示すように、たとえば、3台のテーブルを使用すれば、コンテンツやユーザの位置に応じて L 型、扇形、および長方形の作業面を構築することができる。さらにテーブルの数を追加していけば、より複雑な作業面を形成することもできる。これらの検証が進めば、最適な作業空間の在り方を議論することもできるだろう。また、今後は、IoT 等の検討が進めば環境や家具が人々の活動や入力に反応していくことも多くなると考えられる [28]。本研究で示した物理的に再構築可能な作業空間の基盤技術は、未来のオフィスやスマートハウスへと広がり、たとえば、プライバシー制御や介護等への応用も期待で

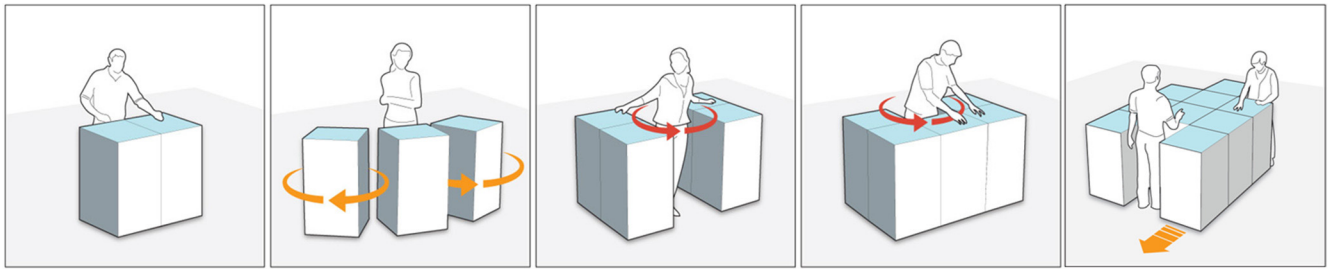


図 12 異なる台数から構成された自動レイアウト変更可能な大型デジタルテーブル

Fig. 12 A multi-display environment is formed by a number of horizontal displays (i.e. two or more displays); each display is mounted on a robotic table affording omnidirectional transformations and rotation.

きると考える。

6.3 手動変形と自動変形

自動でテーブルを動かすことの強みは簡単な入力（たとえば、レイアウトを選択）をするだけで、ユーザの労力なしに、所望の作業環境を構築することができることである。本研究では4台のテーブルを用いたが、この台数が増えるほど手動で動かす身体的・認知的な負担は高まると予想されるため、自動レイアウト変更の効果がより高まるはずである。しかし、今回の実装例のように、事前にレイアウトを定義する場合は高精度に制御できる反面、ユーザの好みやタスクの種類を反映するための微調整が難しくなるという欠点もある。そのため、理想的には、自動変形と手動変形を組み合わせ、大きなレイアウトの変形を自動で行い、その後、必要があれば手動による微調整ができるインタフェースが有用と考える。

今回は、自動レイアウトの変更に際してメニューインタフェースを採用した。メニューは一般的に、候補が増えるに従って選択に時間がかかり、ユーザの認知的な負担を増加させる傾向がある。しかし、現状の4レイアウトを利用する場合においては、4章および5章で報告した実験を観察する限りは、ユーザに特段の認知的な負担は発生していないか、または発生していたとしてもわずかであったといえる。しかし、今後、レイアウト候補数が多い場面を考える場合には、ユーザの選択にかかわる認知的負担を考慮し、ジェスチャのような直接的な入力や人間工学的知見を応用した推薦レイアウトを提示する等、別のアプローチの併用も必要と考える。

さらに、自動レイアウト変更を運用するに際しての検討事項として、移動パラメータの最適化が必要である。今回は安全面を配慮しつつも2秒間という短い時間で変更が完了するように設定したが、この設定は、作業の流畅さやユーザの好み等によって変わる。今回の実装や実験内容では大きな問題は見られなかったが、基本的な方針としては、ユーザが変形の完了を待ってしまうという状況は避け、かつできるだけユーザの体の動きの速さに合わせるようにカスタ

マイズできるような仕組みが必要かもしれない。現在利用しているRoombaでもより高速な移動が可能ではあるものの、より高度な移動ロボットを利用できればさらにカスタマイズ性は増すものと考ええる。

6.4 利き手の影響

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とき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。

6.5 テーブル移動とディスプレイベゼルの影響

提案手法では、テーブル面が分離するため、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]。そのケースに対応するためには、テーブルの移動に合わせて表示しているコンテンツを曲げて表示する等して、コンテンツ間に生まれたギャップの影響を少なくする方法と組み合わせる方法が考えられる。また、ディスプレイのベゼル[2]による影響も当然考えられる。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。

6.6 アプリケーション例

提案手法を用いることで、遠くにあるコンテンツへのリーチをディスプレイ上に表示してあるコンテンツを失わずに得ることができる。その特徴から、複数のアプリケーションウィンドウを並べて開いて作業するとき等、情報群全体へのアクセスが必要とされ、かつ個々のウィンドウへ詳細な入力が必要となる場面に有効だと考えられる。また、画面を分割することにより、今までは立つことのできなかったコンテンツの内部に立って作業することができる。たとえば、地図全体を俯瞰しながら、注目点に立って作業したり、そこから得られる情報を見渡したりすることも可

能である。そのほか、テーブルトップに向けたコンテンツとして、大型の描画ツール、ドラムや鍵盤等の楽器ツール、ボードゲーム等にも応用可能だと考える。

6.7 今後の展望

現在の実装は民生品を利用し、開発コストは今後大幅に抑えられ、簡単に改良できるものである。ただし、移動自由度を増やす場合には 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、コンテンツの大局的な情報を保つ必要があ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ときは、より大きな効果が予想される。

7. まとめ

本研究では、大型デジタルテーブル利用時に、ユーザの操作可能領域を拡張することを考え、自動レイアウト変更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、テーブル面全体の形状を自動的に変形させる。ユーザはテーブルの一部を分割させて生まれた空間を使い、遠方のコンテンツにも自然な姿勢で到達し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。その結果をもと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] Czerwinski, M., Robertson, G., Meyers, B., Smith, G., Robbins, D. and Tan, D.: Large display research overview, *CHI EA '06*, pp.69–74 (2006).
- [2] Bi, X., Bae, S.-H. and Balakrishnan, R.: Effects of interior bezels of tiled-monitor large displays on visual search, tunnel steering, and target selection, *CHI '10*, pp.65–74 (2010).
- [3] Endert, A., Bradel, L., Zeitz, J., Andrews, C. and North, C.: Designing large high-resolution display workspaces, *AVI '12*, pp.58–65 (2012).
- [4] Forlines, C., Vogel, D. and Balakrishnan, R.: Hybrid-Pointing: fluid switching between absolute and relative pointing with a direct input device, *UIST '06*, pp.211–220 (2006).
- [5] Gutwin, C. and Fedak, C.: Interacting with big interfaces on small screens: A comparison of fisheye, zoom, and panning techniques, *GI '04*, pp.145–152 (2004).
- [6] Abednego, M., Lee, J.-H., Moon, W. and Park, J.-H.: I-Grabber: Expanding physical reach in a large-display tabletop environment through the use of a virtual grabber, *ITS '09*, pp.61–64 (2009).
- [7] Kuribara, T., Mita, Y., Onishi, K., Shizuki, B. and Tanaka, J.: HandyScope: A remote control technique using circular widget on tabletops, *HCI International*, LNCS 8511, pp.69–80 (2014).
- [8] Voelker, S., Weiss, M., Wacharamanotham, C. and Borchers, J.: Dynamic Portals: A lightweight metaphor for fast object transfer on interactive surfaces, *ITS '11*, pp.158–161 (2011).
- [9] Tochihara, N., Sato, T. and Koike, H.: A remote pointing method with dynamic C-D ratio during a pinching gesture for large tabletop system, *CHI EA '16*, pp.553–559 (2016).
- [10] Pfeuffer, K., Alexander, J., Chong, M.K. and Gellersen, H.: Gaze-touch: Combining gaze with multi-touch for interaction on the same surface, *UIST '14*, pp.509–518 (2014).
- [11] Lischke, L., Mayer, S., Wolf, K., Henze, N., Reiterer, H. and Schmidt, A.: Screen arrangements and interaction areas for large display work places, *PerDis '16*, pp.228–234 (2016).
- [12] Tandler, P., Prante, T., Müller-Tomfelde, C., Streitz, N. and Steinmetz, R.: ConneCTables: Dynamic coupling of displays for the flexible creation of shared workspaces, *UIST '01*, pp.11–20 (2001).
- [13] Bader, P., Schwind, V., Pohl, N., Henze, N., Wolf, K., Schneegass, S. and Schmidt, A.: Self-actuated displays for vertical surfaces, *INTERACT '15*, pp.282–299 (2015).
- [14] Bailly, G., Sahdev, S., Malacria, S. and Pietrzak, T.: LivingDesktop: Augmenting desktop workstation with actuated devices, *CHI '16*, pp.5298–5310 (2016).
- [15] Takashima, K., Oyama, T., Asari, Y., Sharlin, E., Greenberg, S. and Kitamura, Y.: Study and design of a shape-shifting wall display, *DIS '16*, pp.796–806 (2016).
- [16] Isoyama, N., Terada, T. and Tsukamoto, M.: Multi-tiles: A system for information presentation using divided rotatable screens, *MoMM '15*, pp.14–18 (2015).
- [17] Takashima, K., Asari, Y., Yokoyama, H., Sharlin, E. and Kitamura, Y.: Movementable: The design of moving interactive tabletops, *INTERACT '15*, pp.296–314 (2015).
- [18] Takashima, K., Aida, N., Yokoyama, H. and Kitamura, Y.: TransformTable: A self-actuated shape-changing digital table, *ITS '13*, pp.179–188 (2013).
- [19] Grønbaek, J.E., Korsgaard, H., Petersen, M.G., Birk, M.H. and Krogh, P.G.: Proxemic Transitions: Designing shape-changing furniture for informal meetings, *CHI '17*, pp.7029–7041 (2017).
- [20] ideum, available from (<https://www.ideum.com/products/touch-tables/pro>) (accessed 2019-07-14).
- [21] Tan, D. and Czerwinski, M.: Effects of visual separation and physical discontinuities when distributing information across multiple displays, *OZCHI '03*, pp.184–191 (2003).
- [22] Qin, Y., Liu, J., Wu, C. and Shi, Y.: uEmergency: A collaborative system for emergency management on very large tabletop, *ITS '12*, pp.399–402 (2012).
- [23] Qin, Y., Yu, C., Liu, J., Wang, Y., Shi, Y., Su, Z. and Shi, Y.: uTable: A seamlessly tiled, very large interactive

- tabletop system, *ITS '11*, pp.244–245 (2011).
- [24] Toney, A. and Thomas, B.H.: Applying reach in direct manipulation user interfaces, *OZCHI '06*, pp.393–396 (2006).
 - [25] Banerjee, A., Burstyn, J., Girouard, A. and Vertegaal, R.: Pointable: An in-air pointing technique to manipulate out-of-reach targets on tabletops, *ITS '11*, pp.11–20 (2011).
 - [26] ERGOTRON, available from (<https://www.ergotron.com/tools/workspace-planner>) (accessed 2019-07-14).
 - [27] Shoemaker, G., Tsukitani, T., Kitamura, Y. and Booth, K.S.: Body-centric interaction techniques for very large wall displays, *NordiCHI '10*, pp.463–472 (2010).
 - [28] Müller-Tomfelde, C. and Fjeld, M.: Tabletops: Interactive Horizontal Displays for Ubiquitous Computing, *IEEE Computer*, Vol.45, pp.78–81 (2012).
 - [29] Woźniak, P., Fjeld, M. and Zhao, S.: Limiting trial and error: Introducing a systematic approach to designing clutching, *Chinese CHI '14*, pp.35–39 (2014).



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授/准教授。2010 年東北大学電気通信研究所教授。

博士 (工学)。



工藤 義礎

2019 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前期課程修了。2019 年 4 月より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後期課程在学中。



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。2018 年より東北大学電気通信研究所准教授。博士 (情報科学)。



モルテン フィールド

1990 年ノルウェー科学技術大学 (ノルウェー) 博士前期課程, グルノーブル理工科大学 (フランス) 博士前期課程修了。2001 年チューリッヒ工科大学 (スイス) 博士後期課程修了。2004 年チャルマース工科大学 (スウェーデン)

助教。2008 年同大学准教授。2018 年同大学教授。タンジブルテーブルトップ, モバイル, コラボラティブコンピューティングの研究に従事。Ph.D. in Computer Science。