

TransformTable : 人の空間配置を動的に変化させる自律変形デジタルテーブル

高嶋 和毅^{1,a)} 会田 直浩¹ 横山 ひとみ² 北村 喜文¹

受付日 2014年6月30日, 採録日 2015年1月7日

概要: テーブルの形を物理的に変形可能なインタラクティブデジタルテーブル TransformTable を提案する。これは、ホストコンピュータからの無線コマンドに従って、その形状を各種モータにより機械的に変形させる。これにより、動的に変化するグループインタラクションに対しても、快適かつ適切な空間を維持したり、創り出したりすることが可能になる。また、テーブルの形は周囲の場の印象や質に変化を与えることから、テーブルの自律変形によって、その場やインタラクションを誘導することも可能である。さらに、スクリーン（作業面）を表示する視覚的なデジタルコンテンツの形に応じた適切な形にすることができるため、コンテンツの形に沿ったグループインタラクション空間を構築することも可能である。そのプロトタイプとして、本研究では、テーブルの形を代表的な3つの形（正方形、円形、長方形）に変形することが可能なテーブルを設計し、実装した。さらに、ユーザスタディにより、テーブルの自律変形が複数人会話中の快適性やインタラクションに大きな変化を与えることを確認した。

キーワード: テーブルトップディスプレイ, グループインタラクション, 空間行動

TransformTable: A Self-actuated Shape-changing Digital Table

KAZUKI TAKASHIMA^{1,a)} NAOHIRO AIDA¹ HITOMI YOKOYAMA²
YOSHIFUMI KITAMURA¹

Received: June 30, 2014, Accepted: January 7, 2015

Abstract: This paper proposes TransformTable, an interactive digital table, whose shape can be physically and dynamically deformed. Shape transformations are mechanically and electrically actuated by wireless signals from a host computer. TransformTable represents digital information in a physically changeable screen shape and simultaneously produces different spatial arrangements of users around the table. This provides visual information while changing the physical workspace to allow users to effectively handle their tasks. We implement the first TransformTable prototype that can deform from/into one of three typical shapes: round, square, or rectangular. We also discuss implementation methods, further application designs and scenarios. A preliminary user study shows fundamental and potential social impacts of the table transformation on users' subjective views in a group conversation.

Keywords: tabletop display, group interaction, spatial behaviors

1. はじめに

我々は、日常生活の中で、様々なテーブル（PC テーブル、ダイニングテーブル、会議テーブルなど）を様々な用途（勉強、食事、ボードゲーム、ミーティングなど）に応じて使い分けている。ほぼすべての生活場面に密接に関わるために、テーブルについては様々な検討が進められ、テ

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 東京農工大学大学院工学研究院
Tokyo University of Agriculture and Technology Institute of Engineering, Koganei, Tokyo 184-8588, Japan

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

ブル面にタッチディスプレイを搭載したインタラクティブデジタルテーブルなども登場し普及しつつある。

社会心理学の分野においてもテーブルは重要な研究テーマであり，テーブルの形やサイズは周囲の人々の空間配置に影響し，その場の印象や雰囲気を変える力を持つといわれている [11], [15]．たとえば，正方形のテーブルは4つの明確な角と領域があるため，個人的な領域を確保することに長けており，また，長方形のテーブルは短辺に位置する人に対して注目を集めるようになる．円形のテーブルは個別の領域を持たず，周囲の人々の対等な対話やインタラク션을促すものである．それぞれのテーブルの形の特徴を生かした場面として，ボードゲームなどの競争，リーダーシップを要するディスカッション，晚餐などがあげられる．実際に，国際紛争に関する会議は円卓で行われることが多く，違反行為が許されないボードゲームは正方形が用いられるなど，特にタスクや利用者の関係性に注意を払う場合は，適切なテーブルの選択が重要である．

複数人によるグループインタラクション（協調作業や会話など）では，タスク内容，場の印象や雰囲気，構成員やその役割などが時間とともに動的に変化することが数多くある．それぞれの場面で構成員すべてが快適に過ごすためには，形が異なる複数のテーブルをあらかじめ用意して切り換えるか，手動型の形状可変テーブルを利用してそのつど変形させる方法などがあげられる．しかし，テーブルの取り換えや準備など本来の作業とは別の労力を要し，空間の快適性や作業生産性を阻害してしまう可能性が高い．構成員が本来のタスクに集中することができ，かつ空間を有効活用して快適な場を構築維持するためには，作業場の中心であるテーブルがより知的になり，その物理性を活用して空間を管理することが望ましい．

そこで本研究では，状況に応じて自律的にテーブル面の形を変形することが可能なインタラクティブデジタルテーブル TransformTable を提案する．これにより，動的に変化するグループインタラクションに対しても，ユーザ自身が特に意識せずに，適切な空間や雰囲気を維持したり，創り出したりすることが可能になる．また，テーブルの形は周囲の人々の配置に影響を与え，そのテーブルの周囲の場の印象や質に変化を与える特徴を持つことから [11], [15]，テーブルの形が自律変形することによって，その場やインタラクションを誘導することも可能であると考えられる．さらに，デジタルテーブルの面はスクリーンにもなっているため，表示する視覚的なデジタルコンテンツの形に応じた適切な形のスクリーンにすることができ，コンテンツの形に沿った形のグループインタラクション空間を構築することも可能である．本稿では，TransformTable のプロトタイプ1号機として，先に述べた円形，正方形，長方形の3つの形状に変形することができるインタラクティブデジタルテーブルの設計と実装について述べる．また，主にグ

ループインタラクションにおけるアプリケーションシナリオを議論し，テーブルの自律変形が，代表的なグループインタラクションである会話中の人の行動や主観にどのような影響を与えるかを，予備的なユーザスタディを通して議論する．

2. 関連研究

手動で変形できるテーブルは多く販売されており，状況に応じたテーブルの拡張は一般的な要求であるといえる．本章では，デジタルテーブルの設計に関する議論，形状を変形するテーブルやディスプレイ，テーブルが持つソーシャルインパクトについての研究を述べる．

2.1 デジタルテーブルとグループインタラクション

インタラクティブデジタルテーブルは長くさかんに研究されており，複雑なデータを複数人で協調的に閲覧，操作する際に有効な手段とされている [3], [14]．テーブルの設計に関しても検討が進んでおり，たとえば，より良い協調作業空間を設計するためのテーブル面の大きさとグループサイズとの関連が調査されている [18]．この研究では，テーブル面の大きさはグループの作業効率に影響を与えないが，実験参加者の主観評価に有意な影響を与えることを示している．同様に，デジタルテーブルの面やその周囲の人々のテリトリーの獲得 [20] や立ち位置の設定 [21] といった空間行動も活発に議論されてきた．

近年，複数人による情報共有をより効率的にするために，テーブルの周囲にいる人々の身体的位置や向きを検知可能なデジタルテーブルが提案されている [1], [5]．このような研究は，ディスプレイと人々の空間的關係（たとえば，F陣形）に基づいた近接学インタラクションと呼ばれ [5]，活発に研究が進められている．

2.2 形状可変ディスプレイ

人々の空間配置に合わせて形状が変化するディスプレイはこれまでにいくつか提案されてきた．たとえば，Connectable は個人用のモバイル型テーブルトップディスプレイで，2台のテーブルをユーザが近づくだけで結合することができ，会話を始めるにあたっての共有空間を簡単に作ることができる [21]．Xpaaand は，柔軟に引き伸ばしが可能な巻取り式フィルムで構成されている携帯型スクリーンであり，複数ユーザの位置関係に応じて簡単に適切な大きさに調節することができる [10]．Chained display は，複数のプラズマディスプレイを結合して作られたパブリックディスプレイであり [12]，3つの形状（水平型，凹型，六角型）を手動で切り替えることができる．評価実験により，ディスプレイ形状はユーザの空間行動に影響を与えることを示している．

近年，手動ではなく，自律的に変形するディスプレイ

やインタフェースに関する研究がさかんに行われている [2], [9], [13], [17]. たとえば, 表示面を変形することによって, 三次元的な凹凸を表現したり [4], [7], [8], [9], 触覚フィードバックを与えたりすることができる. また, 作業や状況によって動的かつ複合的なアフォーダンスを提供するディスプレイもある [13], [17], [19]. このようにデバイスの物理的な変形は, それに関連する多くのインタラクションに影響を与えるといえ, デジタルテーブルの形を動的に変化させることは, テーブル周囲のグループインタラクションに大きく刺激を与える重要な意義を持つと考えられる.

2.3 テーブルの形と人々の空間配置

社会心理学の分野では, 代表的なテーブルの形とテーブルの周囲の人々の空間配置について長年検討されており [11], [15], 次に示すような特徴が明らかにされている [15].

円形のテーブル: 角や側面がないため, 平等と結束の象徴とされており, 均衡のとれた配置を促すものである. また, 円形のテーブルには明白な個人領域が生まれにくいいため, テーブルの周囲の人の動きが発生しやすいという特徴もある. そのため, パーティなどの社交場, 国家間の外交や対立を解消するための会議など対等な関係を強調すべき場面で利用されることが多い.

正方形のテーブル: 典型的な正方形のテーブルは 4 人で使用する設計となっていることが多い. 4 つの角は, 4 つの領域が独立していることも意味しており, 等しい長さの 4 辺は確かなパーソナルスペースが保証されている. このことから, 正方形のテーブルは地位や権力が等しいことによる平等性を表すが, 個人領域が明確になるという特徴から, 協調作業よりも競争や交渉といった場面に適している.

長方形のテーブル: 長方形のテーブルの主な特徴は正方形のテーブルとほぼ同様である. しかし, 短辺に人が位置し, もう一方の短辺に人がいない場合は, 前者は一般的にテーブルの上座として認識される. 上座に位置する人は人々の行動やインタラクションを簡単に観察できる状況になることから, 長辺に位置する人々から多くの注目を得ることになる. そのため, 進行役や指導者がいるミーティングや会議に適するとされる.

これらの知見は, テーブルの形が周囲の人々のインタラクションに影響を与え, また形によって異なる場の印象を創り出すことが可能であることを示している.

3. TransformTable

これまで述べてきたとおり, インタラクティブデジタルテーブルの多くはインタラクティブな操作と情報提示ができるディスプレイを持つテーブルとして設計され, 協調作業などを便利に行わせる基本的なインタフェースとして発

展してきた. しかしながら, テーブルとしての機能は従来のテーブルとほぼ同様であり, グループインタラクションにおける動的要因 (構成員の変化, タスクの変化, 雰囲気の変化など) に対して柔軟かつ適切な空間や作業面を提供しようとするものではなかった.

テーブルの大きさや形は周囲の人々の行動などに大きな影響を与えることが知られているため, 本研究では, 動的に形を変化させることができる自律変型デジタルテーブル TransformTable を提案し, 会話などのグループインタラクションやタスクの状況に応じた空間や, 異なる印象を持つ空間を創り出す新たな方法について検討する. 本章では, TransformTable のプロトタイプの実装を詳細に述べる.

3.1 テーブルの形状

TransformTable のプロトタイプは, 社会心理学の知見 [11], [15] と基本的な家具デザインに基づいて設計され, 先に述べた 3 つの基本的な形 (円形, 正方形, 長方形) に可変するものとした. その理由は, これらの 3 つの形が十分な社会的な影響を持つと予想されることと, それら以外の形 (三角形, 半円, L 字型など) の効果をこれら 3 つの形の効果を組み合わせることで見積もれると考えられるからである. 視覚デジタルコンテンツの形に応じて変形することを考えた場合は, この 3 つの形ではやや少ないが, 本提案の主な目的は, テーブル面の変形によって周囲のユーザの立ち位置などを含む行動変化を誘発し, 結果として快適な空間構築行動へと導くことであるため, その他の特殊な形状変化には今回は重きを置かないこととする.

3.2 実装

3.2.1 筐体とスクリーン

テーブルの大きさと高さは 4 人から 6 人のグループに合うように設計された. ここでは, ユーザが着席している状態ではなく立っている状態を想定している. それはテーブル面の変形の効果は, 着席時ではなく起立時に顕著になると考えられるからである. ゆえに, 起立して作業ができる高さにテーブル面を設置する必要がある. テーブル面はアクリル板を使用し, ユーザはコーヒークップや手をその上に置くことができ, また, テーブル面はスクリーンとしても機能する. テーブル面の変形に柔軟に対応する方法として, 変形可能な柔らかい材質も検討したが, 変形時にしわができる可能性が高いことと, 物を置きにくいというテーブルの元来持つ機能が損なわれるため使用しなかった.

実装にあたり, まず, 幅 960 mm, 奥行き 960 mm, 高さ 1,000 mm のスチール製の正方筐体を製作した. 図 1 は, 内部に置かれたプロジェクタの位置やすべての制御盤が配置されたメインプレートやモータ, 車輪などの位置関係を示している. 4 つの側面は機械部品を防護するために, 黒いアクリル板で覆われている (図 2). メインプレートに

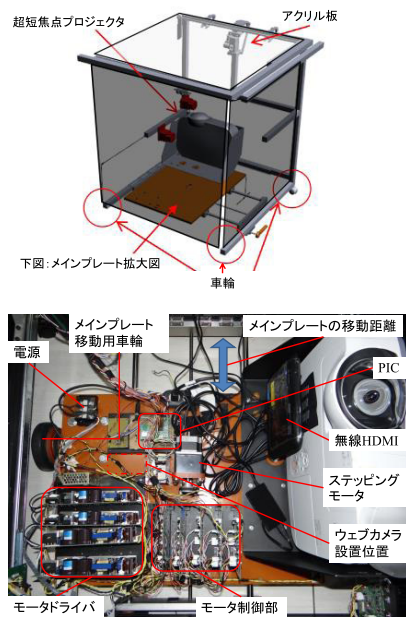


図 1 TransformTable の透視図と筐体内の上面図

Fig. 1 Perspective view of TransformTable and top view of enclosure' inside.

は、超短焦点プロジェクタ (NEC M350XSJL) を上向きに設置し、典型的なリアプロジェクションシステムと同様に、反射フィルムを貼り付けた透明なアクリル板に対して反転した映像を投影するものである。スクリーンの大きさは正方形のテーブルで約 40 インチ、長方形のテーブルで約 60 インチである。正方形のテーブルの最大投影領域は 4:3 の比で約 800 mm × 600 mm、長方形のテーブルでは 16:10 の比で約 1,024 mm × 640 mm である。なお、正方形から長方形に変形する際、プロジェクタの投影中心がずれるため、テーブルの拡張方向にメインプレートを移動させる仕組みを有している。

プロジェクタの映像は外部のコンピュータから無線 HDMI 通信 (WTR-HDAV/AT) を利用して送信される。我々はウェブカメラ (PlayStation Eye) に赤外線透過フィルタを装着したものと赤外線 LED, Touchlib ライブラリ [23] を使用して FTIR 方式 [6] のマルチタッチ入力を実装した。テーブルの変形を考慮し、赤外線 LED は長方形時のスクリーンのすべての側面に取り付けている。赤外線 LED は正方形と円形のテーブルを使用する場合に 3 つの側面にしか設置できないが、この場合でもテーブル面上の約 10 地点を同時に検知することができる。タッチスクリーンを無効にするとテーブル上にモノを置くこともできる。

3.2.2 自律変形のためのモータ操作

テーブルの自律変形はコンピュータプログラムによって制御され、適切な 3 次元位置センサによりテーブルの位置と周りの人々の位置関係をつねに把握したうえで安全に制御されている。本研究では、環境に設置する OptiTrack を使用し、テーブルとユーザにマーカを取り付けることで、

これらの空間内の三次元位置と方向を検出することができる。

外部の操作用コンピュータとテーブルに実装されたマイクロコントローラ (PIC: 16F887, 20 MHz) は Bluetooth を用いてデータのやりとりを行う。外部コンピュータから変形や移動の命令信号を送ることで、すべてのモータドライバ (PIC16F676, 4 MHz) が制御可能である。テーブルには、テーブルの移動に 2 つの 12 V の DC モータ (DME60S8HPA) と、プロジェクタが設置されているメインプレートの位置調整にステッピングモータ (PK264B2-SG3.6) (正方形と長方形間の変形時)、側面を覆うための壁の開閉に 4 つの 12 V の DC モータ (TG-47C-VG-230-KA)、4 つの半楕円のパネルの昇降に 24 V の DC モータ (TG-47C-WM-145-HA)、スクリーンの形を長方形へ変形するための筐体の拡張に 2 つのリニアモータ (LAW2B90AW-6)、スクリーンの形を正方形から長方形へと変形する際の追加パネルの昇降に 2 つの 24 V の DC モータ (TG-47C-WM-145-HA) が取り付けられている。すべてのモータは PIC によって管理された各々のドライバによって制御されている。

TransformTable のすべての動作指示とスクリーンに投影される視覚コンテンツは無線通信を使って外部コンピュータから送られている。このプロトタイプはプロジェクタとメインの PIC などを作動させるために外部電源のみを導入しているが、今後、筐体内部を工夫して内部電源を設置する予定である。

3.2.3 自走と回転のためのモータ操作

テーブルは空間内で柔軟に動けるようにモータと車輪で並進移動と回転をすることができる。

テーブルの移動と回転は、筐体の底に取り付けられた 2 つの 12 V の DC モータ (DME60S8HPA) と 2 つの車輪を利用して操作される。両輪が同じ方向に回転すればテーブルは前後に移動し (約 0.3 m/sec)、異なる方向に回転すればテーブルの中心を基準に回転する (約 $\pi/4$ rad/sec)。典型的な二輪モータのドライバのように、回転軸と回転角度は 2 つの車輪の速度を別々に調整することで変えることができる。テーブルとユーザの正確な位置は外部センサ (OptiTrack など) で検知できるため、ソフトウェアを通じてテーブルの位置と方向、形を精密に制御可能である。

3.3 変形

本プロトタイプは、円形 ⇄ 正方形 ⇄ 長方形の変形をすることができる。変形のスピードは、変形箇所とユーザの衝突がないように配慮して設定されている。

3.3.1 正方形と円形

3 つの形のテーブルの各種の寸法を図 2 に示す。正方形のテーブルは 850 × 850 mm のアクリル板をテーブル面とスクリーンとしている。円形のテーブルの筐体の大きさは

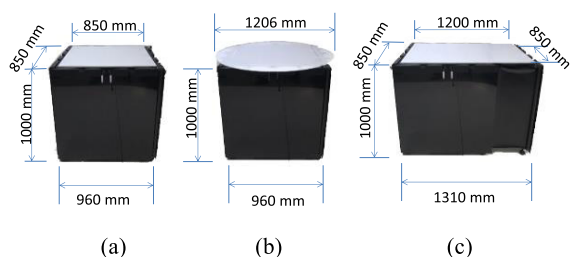


図 2 各形状の TransformTable の見取り図

Fig. 2 Sketches of three TransformTable shapes.

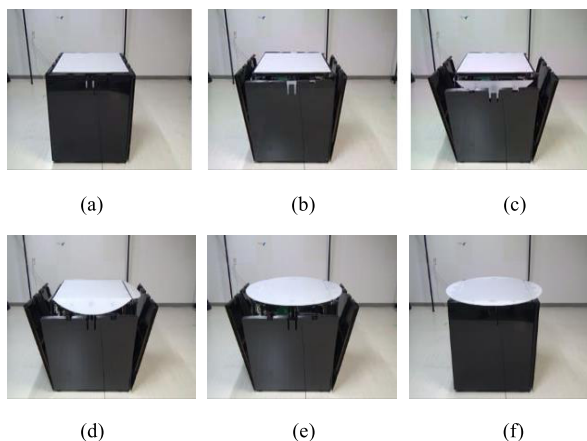


図 3 正方形から円形への変形

Fig. 3 Transformation flow from square to round.

正方形のテーブルと同じであるが、テーブルのスクリーン面の直径は 1,206 mm であり、正方形のスクリーンに 4 つの半楕円のパネルを取り付けることで変形が完了する。その結果、スクリーンの大きさは $7,225 \text{ cm}^2$ から $11,417 \text{ cm}^2$ に変わり、円形のテーブルの大きさは 3 つの形の中で最大となる。

図 3 は正方形のテーブル (図 3(a)) が円形 (図 3(f)) に変形する一連の流れを示している。まず、テーブルの側面の壁が外側に開き始める (図 3(b))。テーブルの底にある蝶番でとめられた壁は自重によって外側に傾き、壁の中のモータのローラに取り付けられた紐によって支えられている。壁が開ききったら (図 3(c))、テーブルの中にある半楕円のパネルが壁の中に設置したモータとギヤ (図 4) によって持ち上げられ (図 3(d))、正方形のパネルの各側面に取り付けられる (図 3(e))。正方形のパネルの各側面に半楕円のパネルが水平に取り付けられたら、壁を支える紐をモータで巻き取り閉じる (図 3(f))。半楕円のパネルは正方形のパネルと同じアクリル板が使用されているが、現段階ではそのパネルはスクリーンとして使用できない。正方形から円形への変形は約 20 秒、円形から正方形への変形は約 18 秒の時間がかかる。これらの変形ではスクリーンの中心は同一なので、筐体内のプロジェクタは移動しない。

3.3.2 正方形と長方形

図 2 の (c) に長方形のテーブルの寸法を示す。長方形

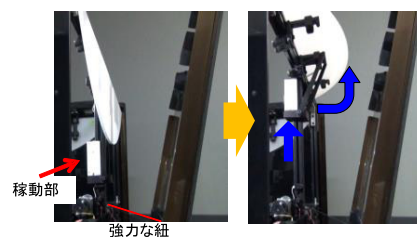


図 4 壁と半楕円のパネルの挙動

Fig. 4 Behaviors of wall and fan-shaped panel.

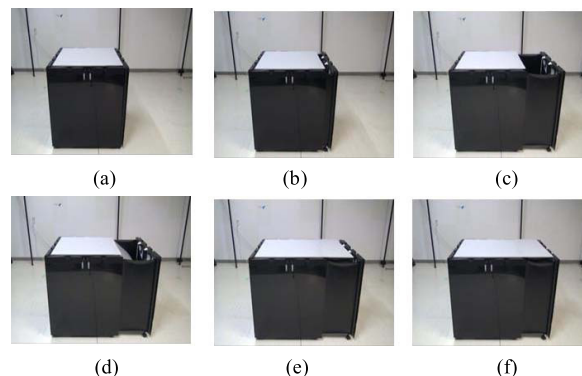


図 5 正方形から長方形への変形

Fig. 5 Transformation flow from square to rectangular shape.

時の筐体の幅は正方形から 450 mm 伸びて 1,310 mm になり、 $350 \times 850 \text{ mm}$ のパネルを正方形パネルの一边に並べて取り付けることで、スクリーンの大きさは $7,225 \text{ cm}^2$ から $10,200 \text{ cm}^2$ に変化する。

図 5 は、正方形のテーブル (図 5(a)) が長方形 (図 5(f)) に変形する一連の流れを示している。まず、ある側面の壁が 2 つのリニアモータとテーブルの底にある車輪によって外側に向かって移動する。このとき、ロールカーテンを使うことで拡張された側面も覆われるようになっている (図 5(b) と (c))。壁の移動が完了すると、正方形のパネルと同じ幅のパネルがベルトとモータによって持ち上げられ (図 5(d))、さらに、移動した壁が、そのパネルを支えるために、少し内側に戻る (図 5(e) と (f))。

正方形から長方形への変形、および長方形から正方形への変形は約 20 秒の時間がかかる。これらの変形については、スクリーンの中心にプロジェクタ位置を合わせる必要があるため、図 5 に示す変形後に、プロジェクタの位置 (メインプレート) をステッピングモータで移動させる。移動距離は 175 mm で、それが完了するまで約 1 分 30 秒の時間が必要となる。

3.3.3 円形と長方形

円形から長方形と長方形から円形の変形は、図 4 と図 5 の一連の組合せで達成される。変形に要す時間は約 40 秒である。

3.4 ドライバソフトウェア

テーブルの変形と移動は、Visual Basic によるプログラ



図 6 動的な空間生成の例

Fig. 6 Examples of dynamic space managements.

ムで実装された外部プログラムによって制御される。テーブルとコンピュータの通信は Bluetooth を用いて行われる。プログラムは各種の壁、半楕円のパネル、長方形のスクリーンを補うための拡張パネルのモータドライバを別々に操作することが可能である。またスクリーン面のタッチ検知のために Touchlib [22] を用いてソフトウェアも実装した。図 7 は、5 点のタッチ位置を検出できていることを示している。



図 7 マルチタッチ

Fig. 7 Direct multi-touch.

4. アプリケーションシナリオ

4.1 対人インタラクション空間の動的な制御

TransformTable は協調的な作業空間を動的かつ柔軟に創り出すことができる。一例として、複数人の会話に参加する人数が変わるという場面で説明する。このようなグループの構成員が動的に変更される場面は、パーティや、会社、教室などで行われる会話では一般的であり、またその変化によって様々な印象が変わる。たとえば、正方形のテーブルの 4 辺に位置する 4 人による会話を取り上げる。その場にさらに 1 人が加わった場合 (図 6 (a) の最右の男性)、その人はおそらく等間隔で位置する 2 名の空間に割り込むことになり、人々の配置が等間隔であったテーブルの周囲の空間のバランスは崩れる可能性が高い。また、テーブルの形状 (4 人用) はその用途 (5 人会話) に適さなくなり、ユーザにとって快適な空間とはいえない。TransformTable を使うことで、そのような変化に柔軟に対応できると考える。人数の増加やばらついた立ち位置を何らかのセンサなど (三次元距離センサや画像処理によるユーザ認識など (たとえば文献 [16])) で検出すると、テーブルの形を円形に変形することで、新たに参加した人も適度な個人領域 (たとえば手を置くなど) を確保でき、均等な配置 (適度な対人距離) による快適な空間を得ることができると考えられる (図 6 (b))。この例では、円形のテーブルではなく、長方形のテーブルに変形することでも対応でき、この場合は円形とは違った雰囲気を創り出すことが可能である (図 6 (c))。

以上の例では、あるイベントに基づきテーブルが変形するものであるため、ユーザはその形状変化の意味は比較的理解しやすく、簡単にその効果や利点を会話やインタラクションに取り込むことができると考えられる。

4.2 会話スタイルに応じた動的な空間生成

TransformTable はテーブルの周囲で行われる会話スタイルを動的に制御することが可能である。先行研究 [11], [15] や我々の予備実験では、正方形のテーブルは競争場面向き、長方形のテーブルは短辺に位置する人のリーダーシップを高め、円形のテーブルは対等な立場でのインタラクションを促進する。したがって、会話スタイルが動的に変化する場面において、TransformTable はそれに柔軟に対応でき、つねに適した空間を提供できるユニバーサルテーブルとして利用できる。

また、自律変形できるという特徴を活用し、たとえば、会話の状態をセンサなどで推定したうえで、テーブルの形によってテーブルの周囲のユーザの立ち位置を変化させ、ある会話スタイルに誘導することも可能であると考えられる。たとえば、複数人の会話において、多様な意見を集めるブレインストーミング場面が検出された場合は、円形のテーブルに変形することで、特定の人の発言が多くなる状況を回避してバランスの良いインタラクションを促す (図 6 (a) から (b))。または、あるリーダーのもとで意思決定をする場合には、長方形のテーブルに変形して短辺にそのリーダーを配置することで、その場でのリーダーシップを高めることも可能である (図 6 (b) から (c))。これらの例では、テーブルの物理形状が変化するために高い確率で周囲のユーザの動きや立ち位置の変化を誘導することに成功すると考えられる。

4.3 コンテンツの形に沿った作業空間の構築

TransformTable は、デジタルコンテンツの形に応じて、スクリーン (テーブル) の形を最適化することができる。たとえば、地球や野球場など円に近い形のコンテンツを

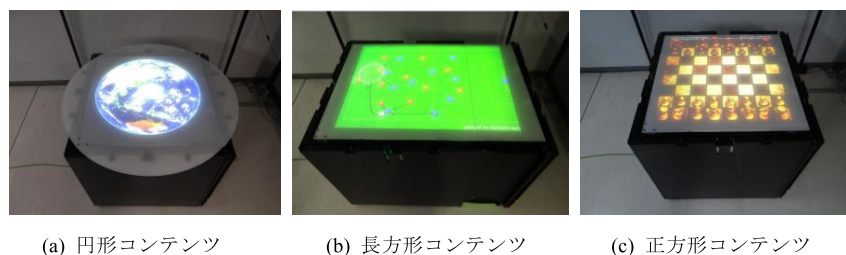


図 8 コンテンツの形に応じたスクリーンの変形の例

Fig. 8 Physically enhanced content visualization.

表示する場合は、円形のテーブルで表示する (図 8(a)). または、長い文章や 16:9 のアスペクト比の映画、またはサッカーなどのフィールドを見る場合は、長方形を用い (図 8(b)), チェス盤のような正方形コンテンツを見る場合には、正方形のテーブルに変形する (図 8(c)). このようにスクリーンを変形することで、コンテンツの形がより強調され、また、その周囲のユーザの立ち位置はコンテンツの形に沿ったものになるため、デジタルテーブルとして、コンテンツへのアクセシビリティが高い適切なワークスペースや場が形成できると考えられる.

5. テーブル変形効果に関する観察実験

本章では、TransformTable の最も基本的な効果を調査した観察的なユーザスタディについて述べる. テーブルの変形がグループインタラクションにどのような効果を残すのかをアンケート、三次元位置センサデータ、および観察により検証し、今後のアプリケーションの設計や心理学実験を計画する場合の基礎的な知見を得ることを目的とする. 最も基本的な変形の効果を調査する予備的な位置付けの実験であるため、スクリーン上の視覚コンテンツやタッチ機能の効果については検証しない.

5.1 実験手続

テーブル変形の効果を予備的に検討するために、最も基本的なものとして、4.1 節で記述したシナリオを用いて検証した. それは、集団で行われている会話に新たに 1 人が加わった場合に、より良い空間配置を創り出すためにテーブルが正方形から円形へ変形するものである.

TransformTable の機能を知らない 20 人 (男性 9 名、女性 11 名、平均年齢 20.7 歳) の実験参加者が実験に参加した. 実験者は実験参加者 5 人を 1 組とし、計 4 組を構成した. 実験参加者は既知関係であった. 実験参加者は頭部に三次元位置センサのマークを取り付け、テーブルの周囲で 5 分間会話を行った後、空間や対人インタラクションの快適性や印象に関する質問項目にリッカート尺度による 5 段階評価を行ってもらった. なお、テーブルの周囲で行われる基本的なグループインタラクションや空間行動を検討するため、自由会話を課題として用いた.

実験シナリオは次の 3 段階 (条件) で構成されている.

- 1.1 正方形のテーブルの周囲で実験参加者 5 人のうち 4 人が会話.
- 1.2 実験開始 2 分後に、残りの 1 人が 4 人会話へ加わり、5 人で会話.
- 1.3 その約 10 秒後にテーブルが円形に変形し、実験参加者は引き続き 5 人で 2 分間会話.

この実験では、グループインタラクションにおける動的要因に関する機能のうち、場の快適性の維持について検討することを目的とした. 実験参加者は 3 条件すべてを経験した後、各条件について「快適に感じましたか」、「立ち位置を変える意識が生じたか」、「隣人との対人距離に違和感があったか」、「机が邪魔であった」などの質問項目に回答した. 1.1 と 1.2 の質問項目の比較は正方形のテーブルが 4 人の使用に適しているかを検討し、1.2 と 1.3 の質問項目の比較は実験参加者がテーブルの変形によって空間の快適さをどのように感じたのかを検討するものであった. また、テーブルの変形に関して、変形したことに驚いたか、変形したことに戸惑ったかという質問項目を分析し、テーブルの変形が会話の流れに及ぼす影響も検討した.

5.2 アンケート結果

表 1 にアンケート結果を示す.

1.1 vs. 1.2 正方形のテーブルを使用した場合、4 人による会話 (5 点中平均 4.2 点) は 5 人による会話 (3.4 点) より快適であることが示された. 4 人の会話にもう 1 人加わることで、正方形のテーブルの 4 つの角や個別領域が新たに会話に加わった人だけでなく他の 4 人に対しても配置に関して悪影響を与えた. 観察においても、不均衡な空間配置を調整するために、実験参加者らは正方形のテーブルより大幅に大きな (テーブルから離れた) 会話領域を形成して、テーブルによる効果を薄めようとする傾向も一部であるが見て取れた. 表 1 に示すように、アンケート結果でも、5 人で正方形を利用する場合には、隣の参加者との距離に違和感を感じるほどではなかった (3.0) が、立ち位置を変える必要性はわずかに認識されていた (3.2). これらは快適性の項目に比べて非常に弱い効果 (ほぼニュートラル) であった. これは、あるタスク (会話) をしている最

表 1 正方形から円形への変形の効果
Table 1 Impact of the transformation from square to round.

アンケート項目	状態		
	1.1 (4人で正方形)	1.2 (5人で正方形)	1.3 (5人で円)
快適に感じましたか	4.2	3.4	4.5
変形したことに驚いたか	-	3.8	
変形したことに戸惑ったか	-	3.0	

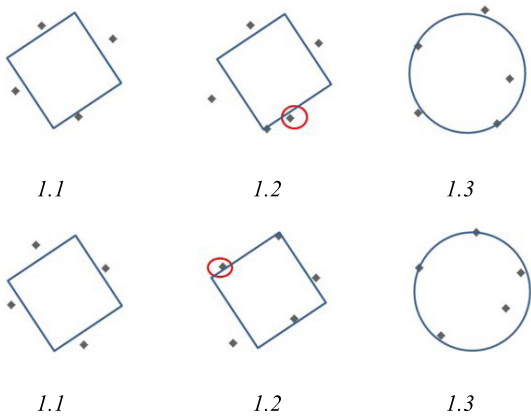


図 9 各条件における実験参加者の立ち位置の例（上：1.3 にて大きく変化した例、下：1.2 と 1.3 においても大きな変化が見られた例）

Fig. 9 Spatial positions of participants for each condition.

中に周囲の人々の空間配置を意識することはそれほど簡単ではなかったためとも考えられる。

1.2 vs. 1.3 円形への変形 (4.5 点) は変形前の正方形 (3.4 点) と比較すると快適な空間を創出できたと考えられる。テーブルの周囲の実験参加者を等間隔の配置になるように円形のテーブルがそれを誘導した可能性が高く、それにより実験参加者にとって適切ではなかったパーソナルスペースを改善することにつながったと考えられる。観察からも、会話領域は小さく円形のテーブルに沿っており、人々の配置の均衡がとれていることを確認した。また、会話中のテーブルの変形は実験参加者を困惑 (3.0 点) させなかったが、ある程度の驚き (3.8 点) を感じさせた。

5.3 立ち位置の変化

1.1, 1.2, 1.3 の三条件における実験参加者のテーブル周囲の空間行動を参加者の頭部に装着した位置センサのデータにより取得した。本実験は予備的な段階であるため、センサデータに基づいた立ち位置の観察のみを示す。4 組による実験結果の中で見られた 2 つの観察例を図 9 に示す。図中、黒プロットは実験参加者の条件内の代表的な立ち位置を表し、正方形および円は各条件における TransformTable のテーブル面を示している。赤でマークした黒プロットは、1.2 の条件において、新たに場に参加した実験参加者を示している。

同図上にて表した傾向は、4 組中 3 組において見られた

典型的なものである。1.1 の初期状態では、4 名の参加者は正方形テーブルのそれぞれの辺の中心付近に立って会話に臨むことが多かった (1.1) が、1 人が新たに場に参加した後は、その参加者 (赤丸でマーキング) とその隣人との距離は小さく、個人領域もかなり狭くなる傾向にあった (1.2)。しかし、1.3 のテーブルが円形へ変形した状態では、参加者はテーブル周囲にバランス良く配置された。図中、黒プロットがテーブル上に表示されている場合は、その参加者の上半身がテーブルに前のめりに少しもたれかかった姿勢であることを示している。このような姿勢は実験を通して非常に多く見られた。

図 9 下に上記とは異なる 1 組の観察を示す。大きな違いは、新たにユーザが場に参加する 1.2 の条件においても、その参加者または場全体のために複数の参加者が積極的に立ち位置を変える動きが見られた。これは参加者らが自発的に快適な環境を作ろうとしていた自然な振舞いであるが、この組の参加者も、5 人会話における正方形テーブルの利用は快適ではなかったと回答しており、テーブルの角などの形の特徴によって参加者全員に適切な個人領域を分担し難かったと推察される。その後、円形に変化した場合 (1.3) においては、1.2 と同様の配置がテーブルの物理的な面に支えられる形で維持されていた (参加者はテーブルに非常に近く立つか、または身を乗り出していた)。

以上のように、本実験では予備的な観察であるものの、おおむね、行動データとアンケートを併用することで、TransformTable の効果を明確に示すことができた。今後、4 章で示した動的な空間制御などのアプリケーションなどについて、対人距離や F 陣形などの空間行動理論に基づいて定量的に検討していくことに十分な意義が見い出されたと考えている。

6. 考察

6.1 形と変形の効果

前章の実験では、最も基本的なテーブル変形の興味深い効果を示した。正方形のテーブルを円形のテーブルに変形することで、実験参加者の空間配置を均一に調整する傾向が観察でき、快適な空間を維持することがアンケートにより確認できた。これらの結果は、テーブルの形に関する心理学的知見と、本稿でも述べた様々なアプリケーション案を支持するものといえる。

実験を通して、テーブルの自律変形は実験参加者を驚かせてしまい、自然な行動や会話を少し妨害した可能性があった。これについては、新しい技術を導入した際の一般的な課題であるが、本研究においては、テーブル上の視覚的コンテンツを有効活用して何らかのアナウンスやアラートを提供することも考えられる。

驚きなどとは別に、ユーザの滑らかな動きを阻害してしまう可能性もあり、これについては変形時間の改善が必須である。しかしながら、現状のテーブルの変形時間（約20～40秒）は、典型的なグループワークが行われる時間（たとえば、会議や協調作業に1時間費やすということは一般的である）よりも非常に短い時間であり、作業の本質に悪影響を与えるものではないと考えられる。TransformTableの利用方法については、ユーザ主導（たとえば、スイッチや身振り）の変形と、システム主導（たとえば、イベント、時間、インタラクションの計測に基づく）の変形があり、これらの違いを今後検討することでも、驚きやユーザの自然な行動の阻害に関して検証することができると考えられる。

先にも述べたように、これまで空間や作業の変化にあたってテーブルや作業場を変えようとしたときは、テーブルの移動、交換、または手動変形のテーブルを利用することが一般的であった。これに対して、TransformTableを利用することで、それらの手間を大幅に削減することができる。また、オフィスや研究室のスペースは有限であり、1台で複数の機能を持たせるという考えは様々な効率の観点で好ましい。しかし、テーブルの変形がすべての動的要因に対応できるわけではない。もし、ユーザが気分を変えるために、または作業に適した場所に移動することを好むのであれば、TransformTableの変形機能だけでは不十分で、移動機能を併用することや、または作動させないということも重要である。これらの連携や運用に関しては今後の重要な研究テーマの1つである。

6.2 実装面における評価と課題

TransformTableは実験中に特に問題なく稼働しており、今後、ソフトウェアおよびハードウェアの改善が必要であるとしても、本稿で示したアプリケーションや心理学実験において利用可能な状態であるといえる。テーブルの変形時間がやや長い点については、安全性を考慮して多くの部品を安定して連続稼働させるためにプログラム上で一定の待機時間を設けているためである。今後さらにデバッグを続けることで、この待機時間の最適化を図る予定である。また、円形と正方形間のテーブルの変形の設計において、テーブルの側面が開く際に、ユーザが少しテーブルから離れることがある。そのような行動は綿密なアプリケーションや心理学実験を実施する際に適切ではない可能性もあるため、半楕円のパネルを収納する別の方法を設計する必要

がある。人の立ち位置の変化を促すという点では、現在の円形は半楕円のパネル部に映像投影できない点はそれほど問題ではないが、側面にWiFi対応の携帯型プロジェクタなどを埋め込むといった工夫をすることで、この問題は改善できる可能性がある。また、より安全性の高い設計をするには、ユーザとの衝突を避けるために近接センサを稼働する部品すべてに取り付けることも今後検討すべきである。

6.3 今後の展開

まず、異なる変形パターンについての実験を進める。長方形と正方形または円形では、参加者の視界も大きく変わるため、リーダーシップ、インタラクションの流れや体の向きなどの観点で実験計画を組む予定である。その際、立ち位置の変化を通じた場や会話の質についても検討すべきである。

形状や変形の効果が確認できた後に、デジタルテーブル上のコンテンツの影響を調査する。テーブルの周囲にいるユーザは、インタラクティブコンテンツが表示されていなくても、テーブルに触れたりもたれたりすることが多かった。これはテーブルに対してユーザが自然と利用しようと近づくためである。そのために、インタラクティブコンテンツをスクリーン上に表示させた場合は、ユーザはコンテンツの形に沿った配置になると考えられるため、よりテーブルに近づき、テーブルの変形の効果はより高まると予想される。これに関連して、表示するデジタルコンテンツの形や向きも周囲のユーザの立ち位置に影響を与えることがあるため、物理的なテーブルの形と視覚的なコンテンツの形の関係についても検討していく必要がある。

その他、会議や議論、ゲーム、指導のようなより複雑なグループインタラクションにおけるテーブルの形や変形による効果についても検証していく必要がある。この場合は様々な社会的ニーズがあり、それによってテーブルそのものの効果や位置づけについても変わるものと考えられる。

さらに、変形の自由度を向上させることにも挑戦する価値がある。たとえば、三角形や半円などのテーブルの形を増やすだけでなく、テーブルの傾きや高さなども変更することでより多様な場面に対応し、より効果的に人々のインタラクションに溶け込むと考えられる。さらに、このテーブルは移動や回転も可能であるため、それらや他の家具などとの連動も興味深い研究テーマとなりうる。

7. おわりに

本稿では、状況に応じて自律的に形を変形することが可能なインタラクティブデジタルテーブル TransformTable を提案した。これにより、余計な労力なしに様々なグループインタラクションに柔軟に対応した空間を維持したり、創り出したりすることが可能になる。また、テーブルの形は周囲の人々の配置を変化させ、場の印象や質に変化を与

えるため、テーブルの自律変形によって、場やインタラクションを誘導することも可能である。さらに、テーブル上に表示する視覚的なデジタルコンテンツの形に応じた適切な形のスクリーンにもなるため、コンテンツに沿った作業空間を構築することも可能である。テーブルの形と変形がユーザの会話などのインタラクションに与える影響をユーザスタディにより調査し、十分な影響力を持つことを確認した。この基礎的な知見や経験はハードウェアやソフトウェアの向上につなげ、今後は、アプリケーションの実装やより詳細な社会心理学的な検討を実施していく予定である。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費助成事業(26730101, 23300081)の助成を受けた。

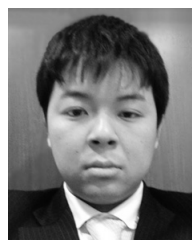
参考文献

- [1] Annett, M., Grossman, T., Wigdor, D. and Fitzmaurice, G.: Medusa: A proximity-aware multi-touch tabletop, *UIST*, pp.337-346 (2011).
- [2] Coelho, M., Ishii, H. and Maes, P.: Surflex: A programmable surface for the design of tangible interfaces, *CHI EA*, pp.3429-3434 (2008).
- [3] Fletcher Capstan Table: available from (<http://www.dbfletcher.com>)
- [4] Follmer, S., Leithinger, D., Olwal, A., Cheng, N. and Ishii, H.: Jamming user interfaces: programmable particle stiffness and sensing for malleable and shape-changing devices, *UIST*, pp.519-528 (2012).
- [5] Greenberg, S., Marquardt, N., Ballendat, T., Diaz-Marino, R. and Wang, M.: Proxemic interactions: The new ubicomp?, *Interactions*, Vol.18, No.1, pp.42-50 (2011).
- [6] Han, J.: Low-cost multi-touch sensing through frustrated total internal reflection, *UIST*, pp.115-118 (2005).
- [7] Harrison, C. and Hudson, S.E.: Providing dynamically changeable physical buttons on visual display, *CHI*, pp.299-308 (2009).
- [8] Hemmert, F., Haman, S., Lowe, M., Zeipelt, J. and Joost, G.: Shape-changing mobiles: Tapering in two-dimensional deformational displays in mobile phones, *CHI EA*, pp.3075-3080 (2010).
- [9] Iwata, H., Yano, H., Nakaizumi, F. and Kawamura, R.: Project feelex: adding haptic surface to graphics, *SIGGRAPH*, pp.469-476 (2001).
- [10] Khalilbeigi, M., Lissermann, R., Mühlhäuser, M. and Steimle, J.: Xpaaand: Interaction techniques for rollable displays, *CHI*, pp.2729-2732 (2011).
- [11] Knapp, M.L., Hall, J.A. and Horgen, T.G.: Nonverbal communication in human interaction, *WADSWORTH CENGAGE Learning*, 8th edition, Chapter 5 (2014).
- [12] Koppel, M., Bailly, G., Muller, J. and Walter, R.: Chained displays: Configurations of public displays can be used to influence actor-, audience-, and passer-by behavior, *CHI*, pp.317-326 (2012).
- [13] Rasmussen, M.K., Pedersen, E.W., Petersen, M.G. and Hornbæk, K.: Shape-changing interfaces: A review of the design space and open research questions, *CHI*, pp.735-744 (2012).
- [14] Rekimoto, J.: SmartSkin: An infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces, *CHI*, pp.113-120 (2002).
- [15] Richmond, V.P., McCroskey, J.C. and Hickson, M.L.: Nonverbal behavior in interpersonal relations, 6th edition, Pearson Education, Inc., Chapter 9 (2007).
- [16] Richter, S., Holz, C. and Baudisch, P.: Bootstrapper: recognizing tabletop users by their shoes, *CHI '12*, pp.1249-1252 (2012).
- [17] Roudaut, A., Karnik, A., Lochtefeld, M. and Subramanian, S.: Morphees: Toward high "shape resolution" in self-actuated flexible mobile devices, *CHI*, pp.593-602 (2013).
- [18] Ryall, K., Forlines, C., Shen, C. and Morris, M.R.: Exploring the effects of group size and table size on interactions with tabletop shared-display groupware, *CSCW*, pp.284-293 (2004).
- [19] Sato, T., Takahashi, N., Matoba, Y. and Koike, H.: Interactive surface that have dynamic softness control, *AVI*, pp.796-797 (2012).
- [20] Scott, S.D., Carpendale, M.S.T. and Inkpen, K.M.: Territoriality in collaborative tabletop workspace, *CSCW*, pp.294-303 (2004).
- [21] Tandler, P., Prante, T., Muller-Tomfelde, C., Streitz, N. and Steinmetz, R.: Connectables: Dynamic coupling of displays for the flexible creation of shared workspaces, *UIST*, pp.11-20 (2001).
- [22] Tang, A., Tory, M., Po, B., Neumann, P. and Carpendale, S.: Collaborative coupling over tabletop displays, *CHI*, pp.1181-1190 (2006).
- [23] Touchlib: available from (<http://nuigroup.com/touchlib/>)



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 年同大学大学院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。日本バーチャルリアリティ学会、電子情報通信学会等会員。博士(情報科学)。



会田 直浩

2014 年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。同年株式会社不二越に入社。現在に至る。



横山 ひとみ

2008 年大阪大学大学院人間科学研究科人間科学専攻博士前期課程修了。2012 年同大学大学院専攻博士後期課程修了。同年東北大学電気通信研究所研究員。2013 年より東京農工大学大学院工学研究院特任助教。日本心理学会、日本社会心理学会、社会言語科学会等会員。博士（人間科学）。



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。

ACM, 電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会等会員。博士（工学）。