

動的・適応型空間ユーザーインターフェース

高嶋 和毅

Dynamic and Adaptive Spatial User Interface

Kazuki TAKASHIMA

This paper explains the background and future perspectives of spatial interfaces developed by the author's research team, called as "dynamic and adaptive spatial interfaces". First, it discusses the author's conceptualization of dynamic and adaptive spatial interfaces and presents techniques for guiding collaborative workspaces using robotic furniture and displays with autonomous mobility and transformation capabilities. Next, it discusses methods for spatial optimization aimed at office health management, such as posture guidance using robotic chairs and monitors. It then explores technologies for constructing more expansive spaces using coordinated multiple robotic furniture and integrating this robotics with room-scale virtual reality technologies to dynamically render visual and haptics room spaces. Finally, it presents expectations for future workspace with dynamic elements.

Key words: robotic furniture, robotic displays, shape-changing interface, spatial behaviors, workspace design, collaboration, virtual reality

はじめに

筆者は、これまでに、ロボットや機械を用いて作業空間を物理的に動的に変容させる技術について研究してきた。タイトルにもあるように、それを個人的に「動的・適応型空間インターフェース」とよんできたが、混乱のないように一般的な言葉で整理する。まず、ユビキタスコンピューティングという有名な考え方がある¹⁾。計算機はいずれ空間に完全に溶け込み、見えなくなり、日常生活のモノとの区別がつかなくなるだろうというビジョンである。提案されてから30年以上経過したが、まだそのビジョンは完全に実現されていない。ただ、センサーやデータサイエンス技術の発達により、空間の中で人々の活動を多次元で計測し、それを長期にわたって膨大なデータを学習することで、人々の状態や情動を推測するシステム野性能が飛躍的に向上してきた。この先には、ユビキタスコンピューティングの考えのように、知能化された空間が、その中にいる人々の状態を計測・理解し、その情報をもとにして、人々の活動を支援しようと働きかけることになっていくだろう。

このように、空間自体が知能化される時代を想定する

と、人々は、空間に散りばめられたIoTデバイス、計算機やモニターなどとのインタラクションだけではなく、その空間がもつ物理的な機能（サイズ、形状、空間内の家具のレイアウトなど）ともインタラクションを深めるべきだと考える。従来の空間は、一度ある目的で家具などのレイアウトを設置すれば、その空間の機能や特徴はほぼ固定され、人々がそれらに合わせて行動や活動することが普通であった。しかし、空間自体がより高機能化されれば、人々が空間の機能に常に合わせる必要はなく、空間側がその機能、特に物理的な形態（例：部屋のサイズや形、部屋内の仕切りの程度、家具の配置など）を人々の活動に合わせて動的に適応させることができる。例えば、オフィスにおいて、ある人が作業を始めようとするればその内容に最適な大きさのテーブルとモニターがその人の前に自動的に設置される。その作業の難度が上がるとつれて、テーブルのサイズが自動で広くなり、作業空間の規模を最適に拡大する。その後、その作業が終われば、次の作業員が作業しやすいようにそれらのテーブルなどは撤去されるか、より広い空間を必要とする人に自動的に再配分されることも考えられ



図1 TransformTable. 自動変形型テーブルディスプレイの3形状.

る。このように、オフィス全体を俯瞰し、作業空間のレイアウトやディスプレイなどの資源を全体最適化に向けて自動的に“模様替え”をしてくれる未来のスマートルームを思い描くことができる。もしこれが実現できれば、人々の作業内容や状況によって作業する空間が常に最適化されるため、人の作業パフォーマンスの向上が見込め、さらに、限られた空間に異なる作業に適した別々の機能を自在にインストールできるようになる。

筆者らの研究グループは、人の活動に対して動的に適應する空間を形成することを目標として、作業空間と中心となる移動・形状可変ディスプレイ・家具およびインターフェースを研究してきた。以下では、それらを中心に解説し、どのような動的空間が構築できうるかを考察する。なお、本研究分野の包括的な動向調査については、Human-workspace interaction というコンセプトで執筆したレビュー論文を参照いただきたい²⁾。

1. 自律移動・変形ディスプレイによる複数人作業環境支援

研究室やオフィスなどの空間デザインでの代表的な課題の一つとして、個人の集中を支援しながら複数人作業へも対応する点が挙げられる。人の作業効率やコミュニケーションの質は、空間や環境の性能に強く影響を受けることが知られており、作業の中心となるテーブルや椅子の配置などは、人の空間行動（対人距離や陣形など）に強く影響する。個人用に設計されたデスクの周辺に人が集まって臨時的議論をする場面を考えてみる。十分に広いオープンプランオフィスであれば臨時的複数人作業の場を設けるのは比較的簡単だが、テリトリー型の個人オフィスではパーティションが邪魔をして必要人数が集まれないか、適切な陣形を組めなくなり、基本的な情報共有がしにくくなることがある。この事例は実際に研究室内の活動でも頻発し、多くのオフィス空間デザイン研究でも題材にされるほど重要である。個人と複数人で空間に求める条件がかなり異なる

ため、両立させるのが本質的に難しいのである。近代の先進的オフィスでは、ネットワーク化を始め情報共有などの面でかなり高機能化が進んできているが、残念ながら、現在においても、空間の広さや形態を自動的に変更できる機能は実現されておらず、あまり注目もなされていない。なお、この課題に対する古典的な解決策は、キャスター付きのテーブルやパーティションを使って人が空間を人手で再配置することである。この方法は効果的であるが、人の労力が必要になるため、臨時的協調作業を整えるためだけにその労力の価値があるかの見極めが難しい上、現場の人の視点からでは適切な空間レイアウトが明確でない場合も多い。

そこでわれわれは、従来のオフィスの形態から離れ、作業空間のサイズを決め、かつ人々の注意の中心となるテーブルや共有ディスプレイに移動・変形機能を導入し、人々が場に適した空間行動を取れるように誘導するシステムを研究してきた。図1は、天板の形を自動的に変形・移動することができるテーブルトップディスプレイ TransformTable³⁾である。複数人または個人でテーブルディスプレイを取り囲んで作業する場合において、このテーブルディスプレイは、作業人数や表示コンテンツに応じて天板の形状や位置を自動的に変更し、その周囲に立つ人々を適切な陣形や立ち位置に誘導することができる。例えば、4人の場合は四角形の天板に変形し、それぞれに対して1辺を与え、直角の角部によって緩やかにお互いのテリトリーを表現する。それ以降、6人など規模が大きくなれば、4辺と4つの角をもつ天板では、陣形の取り方に混乱が生まれるため、円形に自動的に変形することで均等な対人距離を生み出しやすくする。さらに、タスクが議論に変わり、リーダー（議長）を指定する場合には天板を長方形に変形し、短辺と長辺で異なる役割を演出することもできる。この場合は短辺に議長を配置すると、場全体を見渡しやすい。複数人の会話は色々なスタイルがあるため、天板の形だけで人々のインタラクションを決定できるとは限



図2 MovemenTable. 移動機能を有するテーブルディスプレイの例.

らないが、視線や身体の向きなど、非言語的な情報のやりとりに影響を与える人々の立ち位置や行動を、強制力をもって、場に適したものに誘導することができる。

図2には、2台の移動型テーブルトップディスプレイ MovemenTables⁴⁾ が連結する様子を示している。現在のオフィスとはかなり異なる形態で、一人一人が1つの自動テーブルディスプレイを持っている設定で、個人作業であれば単一のテーブルディスプレイが割り当てられる。例えば、2人が共同作業に遷移すれば、その2台のテーブルが自走して物理的に接続し、協調作業に適した作業サイズを構築し、かつ表示コンテンツも2台のディスプレイ間で共有できるようにする。この例は、個人作業と複数人作業の切り替えに必要な空間行動と空間サイズを物理的なテーブルの移動・接続（と分離）によって形成するものである。

これらの経験をもとにして、テーブルだけではなく、人々が個人または複数人利用する可能性がある大型のスクリーンに自律移動・変形機能を導入した Shape-shifting Wall Display⁵⁾ も開発した。ここでは、大型のディスプレイを縦に3分割してそれぞれをモバイルロボットで移動させることで、凸型や凹型、またはL型や分離型などの異なるディスプレイ形態を作りだすことができる。これら複数の形態を、ユーザーのジェスチャー、表示コンテンツ、または作業人数の規模によって自動的に制御する。図3では、表示コンテンツに応じた変形を示しており、例えば、個人作業であれば、図3左上に示すように個人作業のプライバシーを守る形状（凹型）が適しており、複数人作業であれば、図3右上に示すようなフラットな形状がよいだろう。ディスプレイに表示されるコンテンツや立つ人と規模によって、それに適した立ち位置や空間行動をディスプレイの形状で動的に誘導しようとする試みである。

われわれ以外の別の研究チームも同じ問題を解決することを目的として、興味深い形状可変ディスプレイ Proxemic Transition⁶⁾ を提案している。複数人で情報を共有する場面では、情報は壁面ディスプレイに表示されるほうが



図3 Shape-shifting Wall Display. 移動・変形機能を有するウォールディスプレイの形状例（左上：プライバシーを保護する凹型、右上：横長コンテンツを表示するための平面型、左下：立体感を増強する凸型、右下：没入感を増強する凹型）。

よいが、より詳細な検討をする少人数ミーティングでは、テーブルトップディスプレイのほうが操作性がよい。このシステムでは、複数人が集まった場合にはディスプレイは壁面型の形状となり、人数が減るか、具体的な操作が増えるにしたがって、そのディスプレイの角度が平面に近づくように変形する。これは、テーブルトップディスプレイは少人数での操作には適しているが情報共有に不向きであるという問題を解決すると同時に、ディスプレイの形状やその変化の過程を見せることで、人々がその状況においてどのような陣形を取るべきか判断しやすくしている。

以上のように、複数人の協調作業を考えるには、必ずその空間のサイズや形状が重要になってくる。これまでの研究の結果、大型のディスプレイや什器の移動変形は、人々の空間行動（歩きや立ち位置）に直接作用できるため効果はかなり大きいことは示されている。しかしながら、ここで紹介した研究の後継は多くなく、空間デザインの課題は研究者間で確実に共有されているものの、ロボットディスプレイを使ってその解決を図ろうとする研究グループは海外を含めて少ない。ハードの実装が大変であることは最大要因であるが、オフィスでは掃除ロボット以外のロボットがまだ浸透していないことと、既存のオフィスの空間デザインが現存している場合は、全く異なるコンセプトのロボットディスプレイによる空間デザインを導入しにくいという理由もあるだろう。しかし、ヒューマンコンピュータインタラクション（HCI）の分野では、小型の形状可変ディスプレイやインターフェースは盛んに研究されており、デバイスの変化を通じたインタラクションの有用性には今後も十分に期待でき、それが身体サイズまたは部屋規模へ展開される可能性は十分にある。



図4 TiltChairによる自然な座位から立位への遷移 (a: 通常座位, b: 座面傾斜開始, c: 座面傾斜角度最大, d: 立位への遷移).

2. 自律変形型個人ワークスペース

大型の変形ディスプレイの研究例は少ないが、自動で変形機能をもつ個人用ワークスペースの研究は比較的活発である。Living Desktop⁷⁾は、デスク上に1軸電動のレールが敷かれており、そこにヨー方向の回転機能をもつディスプレイが搭載されている。そのほか、キーボードやマウスも机の下から磁場を使ってシステムが動かせるような仕組みとなっている。これらを使って、デスクトップ上で、ユーザーの活動や表示コンテンツに合わせてディスプレイが並進または回転して作業を支援するものである。ここでも個人から複数人作業へ遷移する事例が登場し、人が増えた場合にモニターの角度を2人が見やすい角度に自動調整する機能が紹介されている。そのほか、デスクの上で食事を始めるとキーボードとマウスが自動的に撤去される例も議論されている。個人のワークスペースの改善を図る研究では、人間工学的な課題を解決しようとするものが多い。韓国科学技術院 (KAIST) の研究グループは、ロボットアームに液晶モニターを搭載し、それをユーザーが気づかない速さでゆっくり動かすことで、ユーザーの注意を削がない範囲で姿勢を維持調整することができるシステムを開発した⁸⁾。オフィスでの姿勢は健康維持においてきわめて重要であり、座位の姿勢を保つことだけではなく、座位と立位を適切なタイミングで切り替えることが重要とされている。しかし、そのタイミングはユーザーに委ねられているため、強い意識がない限りは普段の業務の中でその切り替えをうまく実践することは難しく、単純なタイマーで知らせる仕組みは業務の邪魔になりかねない。そこで、われわれは椅子の座面がゆっくりと前傾していき、人を自然に立ち上がらせることができる自動変形チェア TiltChair⁹⁾を開発した (図4)。座面の前傾は遅く、かなりの角度 (例えば図4 (c)) に達しても人は座り続けることができ作業に支障はなく、その後、最後の傾きの変化で自然に立ち上

ることができる仕組みになっている。電動上下昇降デスクと併用すれば、座位から立位へ自然に遷移できる。

これらに限らず、電動機構をもつワークスペースの研究は増えており¹⁾、姿勢や人間工学の観点では、物理的な家具の変化は人の身体に直接作用できるため効果も大きい。部屋規模ではなく机単位の小規模な空間であるが、空間を動的に最適化する意義が明確であり、実装および運用と導入上の課題も比較的小さいため、動的空間オフィスの実現に向けて最初の鍵となる研究領域と考えられる。

テレワークなどで家をワークスペースにする機会は増えているため、リビングに関する電動化についても軽く紹介する。世界の都市部での家賃は高騰しており、狭いアパートでも、テレワーク環境など、さまざまな機能をもたせたいという要望が強い。そのため、ベッドを床から天井まで電動で上下昇降できるようにし、昼間はリビングや仕事場をつくり、夜間にはベッドを下ろしてそれだけを使うという家具がある。そのほか、クローゼットを電動で部屋の端から中央にスライドさせて部屋の区切り方を昼と夜で切り替えて異なる作業に適した空間を作る家具なども登場している*1。複数の機能を一つの部屋に設定する方法としてシンプルな実装で理にかなった事例であり、電動化部分の大型化によるコストに懸念はあるが、電動昇降デスクや電動リクライニングソファなど、電動化の家具の流れは確実に存在するため、今後の発展が十分に期待できる。

3. ロボット群による動的な空間づくり

筆者の研究を含めて、これまで比較的小規模で単一のディスプレイまたは2台のディスプレイを移動させて動的な空間を構成する研究が多かった。しかし、先に議論しているような個人と複数人作業の切り替えの場面をより本格的に支援するためには、空間のサイズと仕切りの機能により注目する必要がある。

*1 Ori Inc. <https://www.oriliving.com/>

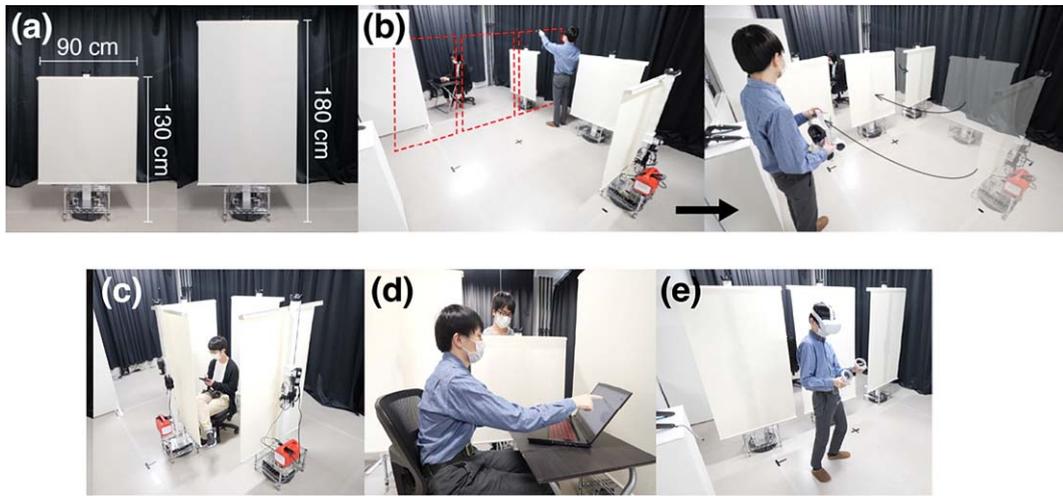


図5 WaddleWallsを用いたパーティション群 (a: WaddleWallsの上下昇降幅, b: WaddleWallsをインタラクティブに配置する様, c: WaddleWallsを4枚用いたプライベート空間の構築例, d: WaddleWallsの高さ変化によるプライベートと対面の切り替え例, e: WaddleWallsを並べて空間を完全に仕切る例)。

そこでわれわれは、自律移動と高さの調整が可能なパーティションロボット群による空間形成システム WaddleWalls を開発した¹⁰⁾。この研究では、4台のロボットパーティションを連携運用させた。4台のセットアップで群という言葉を使うのは大げさであることは承知しているが、コンセプトとしては多数のモジュール化されたパーティションロボットが同時運用できるという可能性を込めている。この研究の構想中にコロナ渦となり、パーティションの設置や空間ゾーニングに対して社会全体から大きな注目を集めていたことは研究の追い風となった。このシステムでは、人は空間を仕切りたい場所を空間ポインティングするだけで、その場所に自動的にロボットパーティションが配置される(図5 (b))。または、事前に好きなパーティションレイアウトを記録しておいて、システムが必要と判断した場合に自動的にその空間レイアウトを構築することができたりする。図5 (c) に示すような個室を瞬時に作り出すこともでき、その逆に、ボタンひとつでその個室を解体し、オープンなスペースを作り出すこともできる。そのほか、図5 (a) に示すように、パーティションの高さを上下昇降することができるので、たとえ個室モードになっていたとしても、図5 (d) のように、パーティションの高さを適宜調整して、簡単な協調作業や対面の会話を、パーティションを動かさずに実現することができる。

本システムは、空間の仕切りの機能を大幅に拡張しており、プライバシーやセキュリティに関する運用が有望だと考えている。現在のオフィス内は光と音の情報で溢れており、その伝搬はランダムで制御不能状態である。特に、モニターで溢れるオフィスならば、目に見える視覚情報は

光としてオフィス空間全体に溢れているが、事前に入念に空間設計をしない限りは、今のオフィスや空間デザインにはその伝搬を制御する機能はない。例えば、ユーザーは、厳密なアカウント認証を経て情報をモニターに表示することができる。しかしながら、一度モニターにその情報が出力されてしまうと、光として他者から閲覧できる状態にさらされる。今回のパーティションシステムを運用すると、認証が必要なデータがどこかの端末に表示された場合で、周囲にアクセス権がない人がいる場合には、自動的にパーティションを配置して他者からモニターを見えないようにすることができる。パーティションの設置で光(モニターの情報)を遮断するという手段はきわめて原始的であるが、効果は確実である。また、パーティションが登場または退場することによって、立ち入り禁止または解除、というセキュリティ上のメッセージも同時に周囲に伝えることもできる。

ロボット家具を用いた空間構築をする研究グループはとても少ないが、ロボットパーティションに関しては、ベルギーの大学のグループにて精力的に研究が進められており、ロボットパーティションを実際のオフィスに導入して効果を調べるフィールド実験がすでになされている¹¹⁾。パーティションについては、もともとキャスターをつけて運んで再配置する運用に馴染みがあるほか、テーブルなどが固定された空間でもその合間に適宜設置するだけでさまざまな空間の機能が生まれるため、実用面のメリットが大きいと考える。

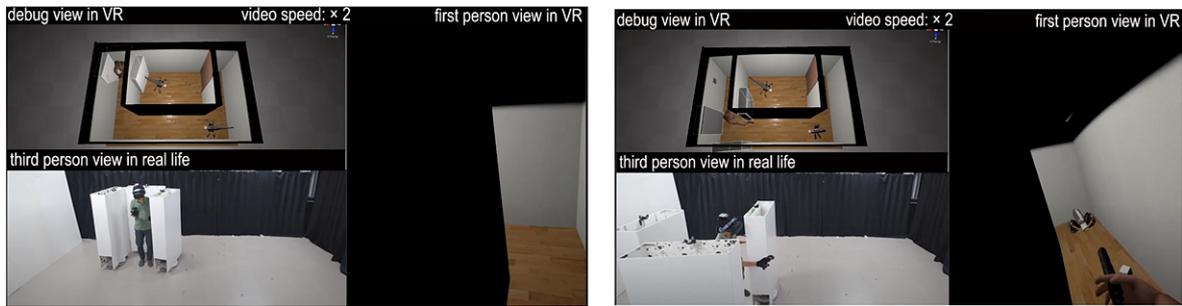


図6 ZoomWalls 壁面プロップを用いたルームスケール VR 内での遭遇型触覚提示 (左: 廊下歩き始めでは左右の壁面が提供されている, 右: 角に到達したときには正面と角部に壁面が提供されている)。

4. ロボット群と VR を用いた視触覚の空間づくり

これまで大型のディスプレイや仕器をロボット化し、空間を動的に形成する技術について述べてきたが、実装コストや運用の壁は確実に大きい。おそらく現在において空間を変容させる最も有望な技術はXR (VRやAR) になるだろう。XR 技術を利用すれば、視覚的には、完全または部分的に空間の見た目を変えることができる。しかし、人の作業には、モノを置く作業台や空間などの物理性が欠かせないため、XR デバイスなどで視覚世界を形成しても物理世界でも適切な空間を形成しなければ多くの作業は成り立たない。VR の分野で力触覚デバイスはさまざまにあるが小規模範囲で提示できるものが多く、ルームスケール VR オフィスのような広い VR 空間において広範囲で力触覚を提示することはかなり難しい。

そこでわれわれは、図6に示すように、2, 3台の壁型のロボットプロップを、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着して歩き回るユーザーの周囲に追従させ、そのユーザーがバーチャルオブジェクト (壁面など) に触れる前に最低でも一つのプロップを先回りして配置し、壁面に触れた触覚をユーザーに提示するシステム ZoomWalls を開発した¹²⁾。これにより、人は HMD を装着して広い VR の世界を体験しながらもその物理性を手や身体表面 (背中など) で感じることができる。視覚と触覚の両面で動的で適応的な空間を形成する基盤ができたとも考えている。ただし、研究の中ではさまざまなチャレンジがあり、今回のような身体サイズのロボットを動かす場合には、触覚 (物理) 世界のレンダリングスピードはロボットの安全速度に制限されるため、ユーザーの歩行速度には全く追従できない。また、衝突安全システムが稼働していたとしても、基本的にはロボット自体の軽量化も求められるため、身体を預けるような (実際の壁のような) 力感覚を出すことは難しい。ただ、この VR と大型のロボット (群) の組み合わせの研究例はかなり多く (例えば、RoomShift¹³⁾、CoVR¹⁴⁾)、筆者

も現在に至るまで精力的に異なるロボットによる異なる力触覚を提供する検討を続けている^{15,16)}。このような研究では、ロボット群の制御やルームスケール VR のためのセンシング技術など、基盤技術の底上げが著しい。また、VR の HMD の性能も向上しつづけ、ゲームや没入感を優先するものだけではなく、働く空間デザインの観点で、XR+Robot の研究領域は今後さらに興味深いものになると考える。

5. 今後の展開

本稿では、動的適応型インターフェースに関する筆者の研究グループの実績を中心に解説した。筆者は個人的にはその可能性を実感しているものの、大きなトレンドを生み出すには至っていない。理由は明確で、初期プロトタイプの実装に大きな負担が伴う上に、ハードウェアのカスタマイズ性が極端に低いからである。今後は、これらの課題を克服するために、これまでも部分的に取り入れてきた「モジュール化」と「XR 視覚ディスプレイの併用」という2つのアプローチを積極的に応用することが有望だと考えている。モジュール化されたロボット家具やデバイスは、既存のオフィスとあまり競合せず導入障壁が低く、部分適用や拡張性に優れる一方で、曲線美などを諦めればきわめて多様な空間デザインを実現できる。ゲーム「マイクラフト」の世界観を現実世界にレンダリングするイメージである。ただし、審美性や情報提示の観点で課題が発生する。それを XR の視覚ディスプレイを併用することで解決することができる。

空間がもつ機能は実に多彩であり、高機能化の方向性も多々あるため、実際には、建築やインテリアなどの知見も取り入れた分野横断型研究とするとより深みができるだろう。さらに、近年発展が目覚ましい AI を応用することで、これまで建築と家具で作られてきた空間ではなく、その場で必要な空間と機能を自動的に生成できるようになるかもしれない。

文 献

- 1) M. Weiser: *Sci. Am.*, **265** (1991) 94–104.
- 2) K. Fujita, K. Takashima, Y. Itoh and Y. Kitamura: *Qual. User Exp.*, **8** (2023) 7.
- 3) K. Takashima, N. Aida, H. Yokoyama and Y. Kitamura: “TransformTable: A self-actuated shape-changing digital table,” *Proc. of ACM International Conference on Interactive Tabletop and Surface (ITS)* (St. Andrews, 2013) pp. 179–187.
- 4) K. Takashima, Y. Asari, H. Yokoyama, E. Sharlin and Y. Kitamura: “MovemenTable: The design of moving interactive tabletops,” *Proc. of Human-Computer Interaction – INTERACT 2015* (Bamberg, 2015) pp. 296–314.
- 5) K. Takashima, T. Oyama, Y. Asari, E. Sharlin, S. Greenberg and Y. Kitamura: “Study and design of a shape-shifting wall display,” *Proc. of Conference on Designing of Interactive Systems* (Brisbane, 2016) pp. 796–806.
- 6) J. E. Grønbaek, H. Korsgaard, M. G. Petersen, M. H. Birk and P. G. Krogh: “Proxemic transitions: Designing shape-changing furniture for informal meetings,” *Proc. of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '17)* (Denver, 2017) pp. 7029–7041.
- 7) G. Bailly, S. Sahdev, S. Malacria and T. Pietrzak: “LivingDesktop: Augmenting desktop workstation with actuated devices,” *Proc. of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '16)* (San Jose, 2016) pp. 5298–5310.
- 8) J.-G. Shin, E. Onchi, M. J. Reyes, J. Song, U. Lee, S.-H. Lee and D. Saakes: “Slow robots for unobtrusive posture correction,” *Proc. of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '19)*, paper 613 (Glasgow, 2019).
- 9) K. Fujita, A. Suzuki, K. Takashima, K. Ikematsu and Y. Kitamura: “TiltChair: Manipulative posture guidance by actively inclining the seat of an office chair,” *Proc. of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '21)*, Article 228 (Yokohama, 2021).
- 10) Y. Onishi, K. Takashima, S. Higashiyama, K. Fujita and Y. Kitamura: “WaddleWalls: Room-scale interactive partitioning system using a swarm of robotic partitions,” *Proc. of Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '22)*, Article 29 (Bend, 2022).
- 11) B. V. D. Nguyen and A. V. Moere: “The adaptive architectural layout: How the control of a semi-autonomous mobile robotic partition was shared to mediate the environmental demands and resources of an open-plan office,” *Proc. of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '24)*, Article 590 (Honolulu, 2024).
- 12) Y. Yixian, K. Takashima, A. Tang, T. Tanno, K. Fujita and Y. Kitamura: “ZoomWalls: Dynamic walls that simulate haptic infrastructure for room-scale VR world,” *Proc. of Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '20)* (Virtual, 2020) pp. 223–235.
- 13) R. Suzuki, H. Hedayati, C. Zheng, J. L. Bohn, D. Szafir, E. Y.-L. Do, M. D. Gross and D. Leithinger: “RoomShift: Room-scale dynamic haptics for VR with furniture-moving swarm robots,” *Proc. of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '20)* (Honolulu, 2020) pp. 1–11.
- 14) E. Bouzbib, G. Bailly, S. Haliyo and P. Frey: “CoVR: A large-scale force-feedback robotic interface for non-deterministic scenarios in VR,” *Proc. of Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '20)* (Virtual, 2020) pp. 209–222.
- 15) R. Gomi, K. Takashima, Y. Onishi, K. Fujita and Y. Kitamura: UbiSurface: “A robotic touch surface for supporting mid-air planar interactions in room-scale VR,” *Proc. of ACM the ACM on Human-Computer Interaction*, Article 443 (Hamburg, 2023).
- 16) R. Gomi, R. Suzuki, K. Takashima, K. Fujita and Y. Kitamura: “InflatableBots: Inflatable shape-changing mobile robots for large-scale encountered-type haptics in VR,” *Proc. of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '24)*, Article 423 (Honolulu, 2024).

(2024年5月16日受理)