

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00262

研究課題名（和文）自律移動デジタルテーブル・ウォール連携による作業空間最適化モデルとシステムの構築

研究課題名（英文）Workspace optimization system and algorithm using autonomous robotic tabletops and walltops

研究代表者

高嶋 和毅（Takashima, Kazuki）

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：60533461

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、環境センサで取得した人々の様々な作業や行動に対応し、複数台の自律移動デジタルテーブルとウォールを連携させ動的に配置することで、常に最適な作業空間を人々に提供するシステムを構築する。これにより、これまでの静的空間デザインでは柔軟に対応出来なかった時間的・空間的な変化を有する個人または複数人による知的活動を持続的に支える新たな動的空間デザイン技術を確立する。人々の作業中の複雑な変化に柔軟にかつ安全に対応するため、それらの動的配置アルゴリズム、プロトタイプ、その検証を繰り返し、コアとなるアイデアの有用性を身体特徴、パフォーマンス、運動知覚、臨場感等の観点で幅広く検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

空間内にいる人の視点から作業空間全体を最適化することは容易ではない。本研究は、空間計測と自由自在に空間のレイアウトを変形することができるロボット型のテーブルトップとウォールトップを複数連携させ、空間を最適化する方法論に取り組んだものである。数学的なアルゴリズムの開発だけではなく、実際にロボット型の仕掛けやディスプレイを開発し、システムとしてのパフォーマンスや人に与える影響も体系的に実証した。得られた知見は多様であり、かつ今後のIoT時代におけるオフィス、研究室、教室、ミーティングルーム、工場などの空間設計に新たな視点を与えるものである。

研究成果の概要（英文）：This project aims to establish the concept of dynamic room using robotic walls and tabletops, which allows users to dynamically optimize their workspace according to user's activities or needs. The idea would solve many of issues arising from statically located furniture and display systems. We performed multiple design process and confirmed the benefits of the core idea of robotic rooms using autonomous robotic tabletops and walltops in terms of physicality, object manipulation performance, content recognition, and sense of presence etc.

研究分野：ヒューマンインタフェース

キーワード：空間デザイン ロボットルーム 空間計測 最適化

## 1. 研究開始当初の背景

オフィスや教室等において、デスクやスクリーンといった什器や機器の配置はあらゆる活動に影響を与えることから様々な作業空間デザインが提案されているが、その効果は作業内容や設定によって大きく異なる事が知られている。現在の先進的オフィスや教室等の多くは、デスク、パーティション、大型スクリーン等は限られた想定シナリオに基づいて静的に配置されるため、多様で時間的・空間的变化を有する複雑な知的活動に柔軟に対応することはできない。さらに、これまでの空間デザインの中心はオフィス家具であり、近年多くの知的活動の中心となっているインタフェース(タッチスクリーンデバイス等)の配置について十分な知見は確立されていない。研究代表者は、これまでに自律移動・変形機能を有するデジタルテーブルやデジタルウォールを開発し、人々に追従するインタフェースや、場やコンテンツに合ったスクリーン形状を動的に提供するシステムを検討してきた。これまでの検討では、提案システムによって、滑らかな作業空間の切り替えや人の空間行動の誘発ができること等が明らかになっており、自律移動型インタフェースは、上記で述べた作業の時間的・空間的な変化に対応するために有望な手段であることは確かである。しかしながら、これまでの申請者の検討では、デジタルテーブルとデジタルウォールは別に進められ、適用範囲も限定的であった。デジタルテーブルは作業面とコミュニケーション空間という二つの機能を提供し、デジタルウォールは複数人で共有できる大スクリーンと空間を隔てるパーティションという二つの役割を持つ。本研究では、デジタルテーブルとウォールを連携的に動的配置させることで、より時間的・空間的に柔軟な作業空間を動的に構築することに挑戦する。

## 2. 研究の目的

本研究では、環境センサで取得した人々の様々な作業や行動に対応し、複数台の自律移動デジタルテーブルとウォールを連携させ動的に配置することで、常に最適な作業空間を人々に提供するシステムを構築する。これにより、これまでの静的空間デザインでは柔軟に対応出来なかった時間的・空間的な変化を有する個人または複数人による知的活動を持続的に支える新たな動的空間デザイン技術を確立する。自律移動テーブルとウォールの連携や拡充だけではなく、人々の作業中の複雑な変化に柔軟にかつ安全に対応するため、それらの動的配置アルゴリズムを決定する空間最適化数理モデルを構築し、それを基にシステムの実装と検証を繰り返す。

## 3. 研究の方法

全研究期間を通して、3つの研究テーマに取り組んだ。

### (1) 複数台の自走デジタルテーブルを活用した最適な作業環境の構築

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。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、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、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)と比較する実験を実施した。

### (2) 自走型ウォールトップを活用した最適なコンテンツインタラクション環境の構築

大型のウォールトップやテーブルトップを利用する作業環境においてコンテンツを視聴又はインタラクションするために最適な環境や空間を検討する。本研究では、コンテンツが持つ空間性(例:三次元アニメーション)をより自然でかつ強調的に表現するために、アニメーションと同期して物理的に自走するウォールトップディスプレイを開発した。表示コンテンツ内の動きやアニメーションに合わせてディスプレイが振動、並進、回転し、そのコンテンツや動きをより強く提示することができる。その後、ウォールトップの物理的な並進と回転がどのようにビューワに認識されるかを調査した知覚実験を実施した。加えて、そのアイデアを実装したアプリケーションを用いた主観評価実験を実施し、没入感等が向上するかどうかを詳細に検証した。

### (3) 複数台の壁型ロボットを人の動きに追従させ再配置を続ける動的環境構築技術

(1)は、複数台のテーブルトップの連携をするためのアルゴリズムやモデルおよびそれを用いたプロトタイプの効果検証をするものであった。本項目では、ウォールトップを複数台連携させて最適な環境構築を実現するアルゴリズムの開発とプロトタイプによる実証に取り組んだ。

なお、申請書にも記載したとおり、視覚的な環境はすべてバーチャルリアリティ技術によるシミュレーションとし、ユーザの空間行動に連動して複数のウォールトップ（物理的な壁）をどのように配置するのかという問題に取り組んだ。衝突判定に基づくシンプルなアルゴリズムに加えて、機械学習によって人の動きを予測した上で複数枚のウォールトップを配置するアルゴリズムを開発した。また、それらのアルゴリズムが実際に家庭用ロボットを用いた動的ウォールトップディスプレイ群においてどのように機能するのかを実機により検証する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 複数台の自走デジタルテーブルを活用した最適な作業環境の構築

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（図1）。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。

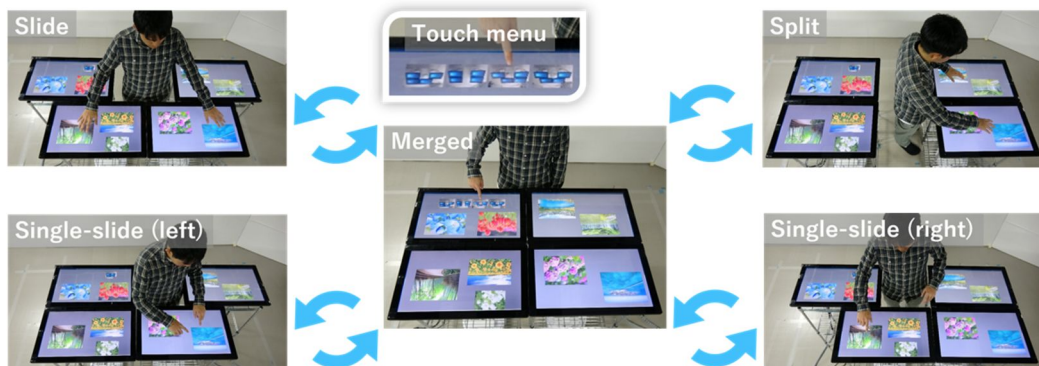


図1. 複数のデジタルテーブルを連携させた動的な作業環境の構築例

##### (2) 自走型ウォールトップを活用した最適なコンテンツインタラクション環境の構築

本研究では、視覚コンテンツのアニメーションと同期したディスプレイの物理的な運動がユーザのコンテンツ知覚および体験没入感に与える影響を調査した。その結果、図2に示すように、ディスプレイ内のコンテンツに同期したディスプレイの運動はコンテンツの知覚において、回転はコンテンツの運動の誇張を生み出すこと、および十分な奥行き手がかりを表現できることなどが分かった。また、そのアイデアを用いて実施した主観評価実験では、物理的なディスプレイの運動が臨場感やリアリティの向上に寄与することなどが分かった。

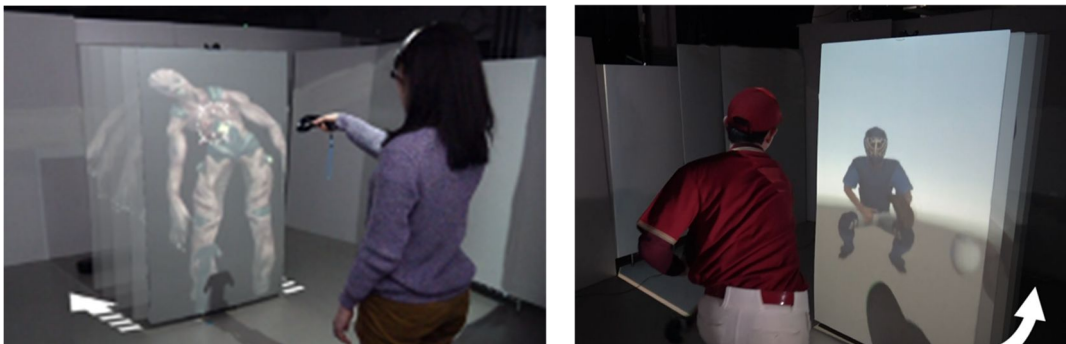


図2. ディスプレイ運動による最適でかつリアリティの高いコンテンツインタラクション例

### (3) 複数台の壁型ロボットを人の動きに追従させ再配置を続ける動的環境構築技術

本研究は、複数の自走する壁型プロップを用いて、ルームスケールVRの空間インフラ（壁やドア等の空間の構造を決める境界）に関する触覚をユーザに提示する方法について検討する。システムはHMDを装着したユーザの位置や動きを計測し、その情報からユーザが触れようとしているVR内の壁面を予測する。その予測に従って、システムは2枚又は3枚の壁型プロップをユーザがその壁面に到達する前に自動的に配置し、ユーザに壁面の触覚フィードバックを提示する。本研究では、単純な4つの壁に囲まれた部屋を題材として取り上げ、シミュレータによって、提案する予測アルゴリズムが遅延なく壁型プロップを配置できる可能性を示した。また、実機を用いたユーザスタディにより、提案手法は、ユーザの歩行速度を制限すれば、限られた速度のモバイルロボットでもユーザに遅延なく触覚を提供でき、没入感や体験の質を向上させることが分かった。今回の探索をもとにして、今後のルームスケールVRの遭遇型触覚提示システムや空間最適化に向けた示唆および課題をまとめる。

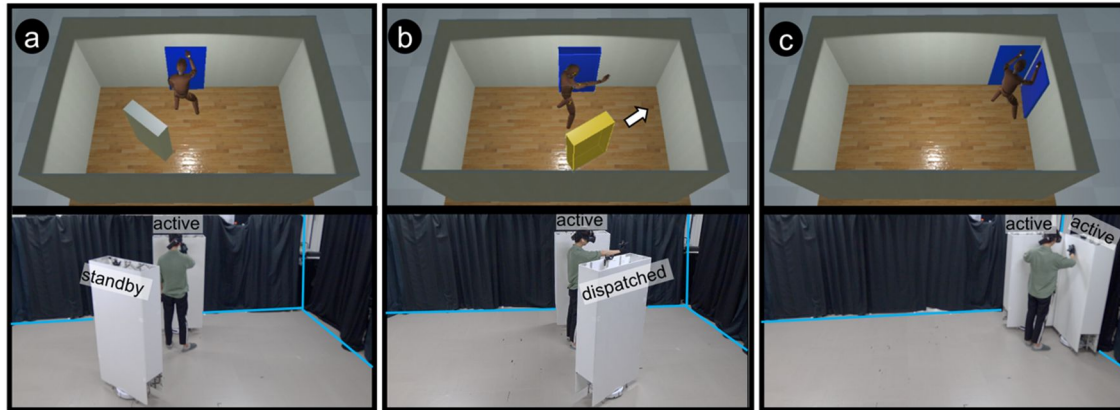


図3．人の動きに連動する複数のウォール型デバイスを用いた動的空間構築の例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 工藤 義雄, 高嶋 和毅, モルテン フィールド, 北村 喜文	4. 巻 60, 10
2. 論文標題 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	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌	6. 最初と最後の頁 1845-1858
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yuki Onishi, Anthony Tang, Yoshiki Kudo, Kazuki Takashima, Yoshifumi Kitamura	4. 巻 24, 3
2. 論文標題 Exploring a Living Wall Display that Physically Augments Interactive Content	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions of the Virtual Reality Society of Japan	6. 最初と最後の頁 197-207
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.18974/tvrsj.24.3_197">https://doi.org/10.18974/tvrsj.24.3_197</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Yuki Onishi, Yoshiki Kudo, Kazuki Takashima, Anthony Tang and Yoshifumi Kitamura
2. 発表標題 Living Wall Display: Physical Augmentation of Interactive Content Using an Autonomous Mobile Display
3. 学会等名 SIGGRAPH Asia 2018 Emerging Technologies (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshifumi Kitamura, Kazuki Takashima and Kazuyuki Fujita
2. 発表標題 Designing dynamic aware interiors
3. 学会等名 Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshiki Kudo, Kazuki Takashima, and Yoshifumi Kitamura
2. 発表標題 Adaptive Workspace using MovementTable
3. 学会等名 In Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces (ISS '17) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 工藤 義雄, 高嶋 和毅, モルテン フィールド, 北村 喜文
2. 発表標題 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
3. 学会等名 情報処理学会シンポジウム インタラクション
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshiki Kudo, Kazuki Takashima, Morten Fjeld and Yoshifumi Kitamura
2. 発表標題 AdapTable: Extending Reach over Large Tabletops through Flexible Multi-Display Configuration
3. 学会等名 Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces, 213-215 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 ヤン 一先, 高嶋 和毅, アンソニー タン, 藤田 和之, 北村 喜文
2. 発表標題 複数の自走壁型プロップを用いたルームスケールVRの空間インフラの遭遇型触覚提示
3. 学会等名 情報処理学会シンポジウムインタラクション論文集
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	北村 喜文  (Kitamura Yoshifumi)  (80294023)	東北大学・電気通信研究所・教授    (11301)	