

令和 6 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03473

研究課題名（和文）自律動作物理デバイス群によるVRユーザの身体支持と高精度インタラクション

研究課題名（英文）Dexterous VR interaction and user body support through coordinated robotic physical props

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） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、ルームスケールVRにおいて、ユーザの空中インタラクション中に生じる疲労などの問題を、様々なロボットプロップ群を用いて解決することを目的とした。具体的には、HMDを装着したユーザの周辺にロボットを周回させ、身体指示や高精度な入力が必要とする場合にユーザに物理的な支えを提供する技術を開発した。次に、それを複数ロボットに応用し、ルームスケールVRの複数の地点で様々な触覚を提示する技術についても開発した。さらに、ロボット型の大型のデバイスの利点を活用し、ルームスケールVR内の身体の向きを操作する技術に応用できることも示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

より柔軟な働き方を実現するためルームスケールVRは未来のオフィスとして期待されてきた。しかしながら、現在のVRやHMD（頭部搭載ディスプレイ）のセットアップはコンパクトである一方で人の身体を支えることができず、本来感じるはずの触覚がない、または人が動ける空間が狭すぎて広大なVR空間を直感的に移動できない、などかなり原始的な課題が残っていた。本研究では、それらを一ずつ解決を試みたものである。依然としてロボットは工作プロトタイプ域であるが、基本的な仕様や性能や効果を本研究で確認できたことは学術的意義はもとより、VRの社会実装に向けて重要な貢献を示せたと思う。

研究成果の概要（英文）：This research aimed to solve the problems of arm fatigue and deterioration of input accuracy during aerial interactions in room-scale VR by using a variety of robotic props. Specifically, we developed technology to have a robot circle around a user wearing an HMD and provide physical support to the user when physical instructions or highly accurate input is required. We then applied this to multiple robots and developed technology to present various tactile sensations at multiple points in room-scale VR. Furthermore, we demonstrated that the advantages of a large robot-type device can be utilized to apply this technology to control the orientation of the body in room-scale VR. Through experiments, we clarified that in both cases, physical support for VR users reduces fatigue and improves the sense of realism.

研究分野：バーチャルリアリティ

キーワード：バーチャルリアリティ ロボット群 ヒューマンコンピュータインタラクション 触覚提示 リダイレクション 人間工学

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

ポストコロナに向けて、時空間の制約を超えた働き方が可能な VO (バーチャルオフィス) に強い注目が高まっている。VO では、現在の VR が得意とする高臨場感創出や身体ジェスチャ入力だけでは不十分で、ユーザがより精密な作業(筆記やスケッチ等を含む)を長時間実施できる仕事場としてのより高度な役割が求められる。しかし、現在の標準的な VR 技術を用いて実装された空間では、コンテンツは全て仮想的に表現されて実体を持たないため、インタラクション時に物理的な感触や反力は再現されない。しかし、このような空中での腕や手指のインタラクションは、ユーザの強い腕の疲労を引き起こし、長時間または高精度の操作は困難である[Juan, et al. 2014]。また、支え無しの不完全な姿勢による作業では、疲労も入力精度も悪化する他、VR 動揺病(酔い)や最悪の場合は転倒などの懸念へもつながる。

人はその身体の構造上、周囲の物理要素と相互に連携し、それらからの反力を受けることで、手指や上肢が持つ細やかな運動能力を発揮する。これらは人の基本的な運動規範であり、あらゆる身体活動の源でもある。しかし、HMD (Head-Mounted Display)による現在の VR のセットアップでは、視覚的に空間を拡張することに優れているが、そのような基本的な人間工学知見が反映されていない。両腕の重さは体重の 16% (60kg の人であれば約 10kg) に達するため、映画「マイノリティ・リポート」で登場する両手空中ジェスチャ入力は魅力溢れるものの、実際には腕を空中で支持無しに動かす高負荷運動にあたる。つまり、身体を支持する仕組みがない現在の VR では、現実空間と同等の質の仕事をすることは不可能と言える。

VR 内において力触覚が重要だという認識は古くからなされており、様々な力触覚デバイスが提案されてきたが、ユーザの手元への力触覚提示によるリアリティの向上[Paulo Dias, et al. 2018]など局所的な対応が多く、VO のような比較的広い VR 空間の任意の場所に即座に力触覚を提供するような空間全体への力触覚提示技術はまだ確立されていない。また、摩擦などの触覚再現だけでは不十分で、文字や図を美しく描くために体重の一部を預けることができる程度の安定性も重要になってくる。事前に机等を配置しておくことで、安定な作業面を得ることはできるが、VR の表現柔軟性を著しく損なってしまう。その他、タブレット端末の併用、ウェアラブル力覚デバイスやドローンによる触覚提示なども広範囲 VR の触覚提示に有望とされているが、美しい筆記やスケッチや長時間のタッチ作業を可能にする程の力も安定性もない。このように、力触覚研究は膨大にあるものの、VR および VO の致命的な課題である空中インタラクションでの疲労や精度低下を克服する方法は未だ明らかになっていない。

2. 研究の目的

本研究では、複数の自律動作物理デバイス群を活用し、VR ユーザがコンテンツを操作する際に必要な物理的身体支持面を、動的にかつ遭遇的に形成する新たな VR システムを開発し、VO 内で精密なインタラクションを実現することを目的とする。デバイス群は、ユーザ

の周囲を常に自走し、必要な場面（VR 内での作業場に到達等）において連結・分離等を駆使して、ユーザ周囲に適切な形状の物理的作業面を動的に形成する。これにより、ユーザは対象となるコンテンツの触覚を得るだけでなく、作業に必要な身体支持面を得ることができ、筆記やスケッチ等の 3 次元空間内で高精度座標指定が必要な精密なインタラクションを安定して実行することができる。

3. 研究の方法

本研究では、上記の目的を達成することを目的として、次に示す 3 つの研究を進めた。いずれもロボット型プロップを用いることでルームスケール VR における体験を強化するものである。それぞれ、ロボットによる身体支持機構に注目したもの、複数のロボットを連携させて広範囲での触覚提示を実現するもの、さらには細かな VR インタラクションを実現するもの、と異なる観点から研究を進めた。(3)については腕の疲労等を改善するもので

UbiSurface:自走式タッチパネルを用いたユーザの空中インタラクション支持手法

InflatableBots: 自走式かつ空気注入型プロップによる広範囲触覚提示手法

RedirectedDoor+自走式ドア型プロップによる移動方向の操作手法

4. 研究成果

(1)自走式タッチパネルを用いたユーザの空中インタラクション面の支持

ルームスケール VR は、物理的なオフィスワークスペースの代替と考えられている。オフィスでの作業では、バーチャル空間内のコンテンツへの注釈などを素早く記録するために、タイピングや手書きといった平面での入力方法を必要とする。しかし、現在一般に普及している VR HMD のセットアップでは、腕の疲労を引き起こし、入力精度を低下させる可能性のある空中インタラクションに依存してしまっている。この問題は古くから認識されているものの、根本的な解決策は得られていないのが現状である。この問題に対処するため、我々は、バーチャルな入力平面（VR ホワイトボードや VR キャンバスなど）を物理的にユーザに提示するために、自動的に位置を変え、ユーザが仮想の部屋を歩き回りながら正確で疲労の少ない入力を達成できるようにするロボットタッチサーフェスである UbiSurface を提案した。キャンバスサイズのタッチサーフェスの位置、高さ、ピッチとヨーの角度を動的に変化させることができる UbiSurface のプロトタイプを実装し、それを HMD を装着したユーザの周囲に配置することで、バーチャル空間の様々な位置と角度に配置されたバーチャルサーフェスを物理的にレンダリングすることができる。つまり、ユーザがバーチャルなホワイトボードに指やペンを持ってスケッチを書こうとすると、本来であれば、物理面はないが、UbiSurface を用いることで自在に物理面を得ることができる。図 1 にその動作例を示す。その技術的性能とユーザの身体をどのように支持でき、高精度なインタラクションを支援できたのかを検証する実験を実施した結果、このシステムが腕の疲労を軽減し、特に、書くタスクにおいて入力精度を向上させることを確認した。これらのデータをもとにして、将来のルームスケール VR セットアップにおけるロボットタッチデバイスの潜在的な利点と課題について議論した。

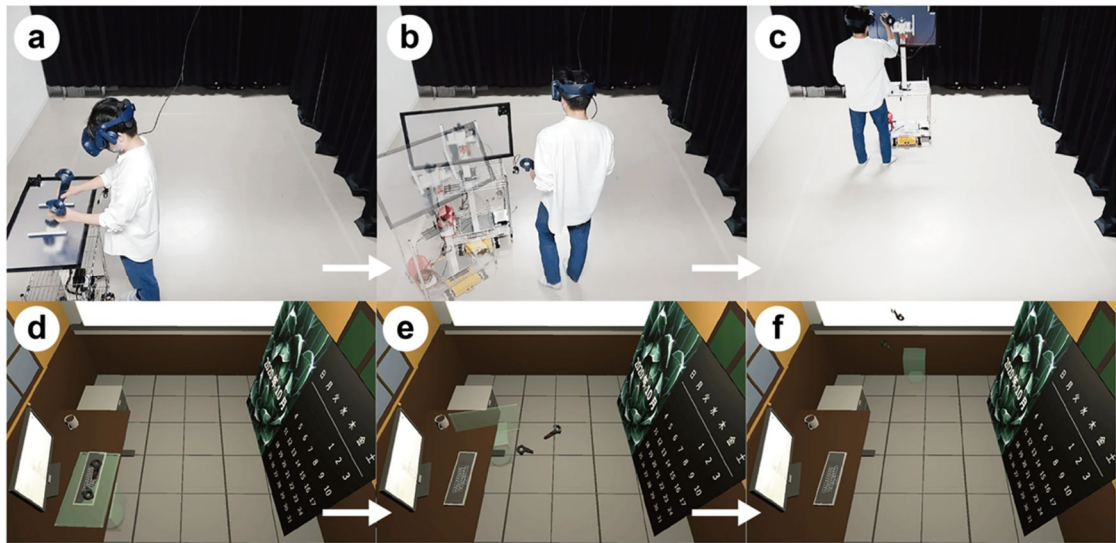


図 1 . Ubisurface を用いたバーチャルオフィスでの作業例

(2) InflatableBots: 自走式かつ空気注入型プロップによる広範囲触覚提示手法

ルームスケール VR のような部屋規模で遭遇型ハプティクスを実現するための、形状変化する空気注入型ロボット InflatableBots を提案する (図 1) . 従来の空気注入型形状変化ディスプレイでは、インタラクションエリアが限定されるため、本研究では移動ロボットとファンベースの空気注入構造を組み合わせることにより、広範囲の安全でスケラブル、かつ大規模に展開可能なハプティックインタラクションが可能になる . 本研究では、3 つの空気注入型移動ロボットを開発した . 各ロボットは、全方向移動ベースとリールベースの空気注入構造から構成される . このロボットは高さ位置を独立かつ高速に変化させることができ (水平 : 58.5cm/sec , 垂直 : 10.4cm/sec , 高さ : 40cm から 200cm) , 複数のタッチポイントを遭遇的かつ動的に提示することで、大空間 (3.5m × 2.5m) において様々な身体スケールの物体や表面をリアルタイムにシミュレートすることができる . このシステムは、安全性、堅牢性など、大規模なインタラクションにおいて独自の利点を持ち、VR 体験の臨場感を向上させることができる . さらに、InflatableBots を用いたユーザスタディを実施し、リアリティや連続面へのハプティクス、ユーザの体験を評価した . その結果、柔らかいオブジェクトに有効であることや、手触りが InflatableBots と異なる場合はハンドヘルドツールの利用によってユーザの体験が向上される可能性があることが示された . また、InflatableBots を用いた触覚体験やアプリケーションに関して議論した .



図 2 . Inflatablebots を用いた広範囲な触覚提示とインタラクション例

(3) Redi rectedDoor+自走式ドア型プロップによる移動方向の操作手法

ルームスケール VR はユーザが物理空間内を自由に歩いてバーチャル環境 (VE) 内を移動できる没入型の体験であるが, VE を移動できる範囲は物理空間の大きさの制約を受ける. この制約を解消するため, 我々はこれまでに開扉動作に着目した方向感覚操作手法である Redi rectedDoors を研究してきた. この手法では, ドアを開ける動作時に, 開扉角度に応じて一定の倍率 (ゲイン) で VE を回転させることで進行方向を操作する. 本研究では, Redi rectedDoors をルームスケール VR 体験に適用するための技術的課題を解決し, 現実的なルームスケール VR の探索体験に適用可能なシステムを構築した. 具体的には, 従来物理空間に固定されていたドアプロップを移動可能とするための自走式デバイスとその配置システム, および, ユーザを適応的に誘導するためのゲインの決定システムを実装した. 本システムの性能評価では, VE 形状 (6 種類), 自走式ドアプロップ台数 (1-3 台), 歩行速度 (0.2-1.0 m/s) の組み合わせによるユーザ歩行シミュレーションを実施した結果, 探索に必要な物理空間の移動範囲を本システムにより平均 26 % 圧縮できることを示した. また, 自走式ドアプロップを 2 台用いる場合に配置のための遅延時間を効率的に減少させられることを明らかにした. 加えて, VE の形状に関して, ドアとドアの間の経路における曲がり方向が同一である VE は, 曲がり方向が異なるものを含む VE に比べてリダイレクションの空間効率が高くなる可能性を示した. その他, 本システムの可能性や, 改良点, 実験上の課題等に関して議論を展開した.

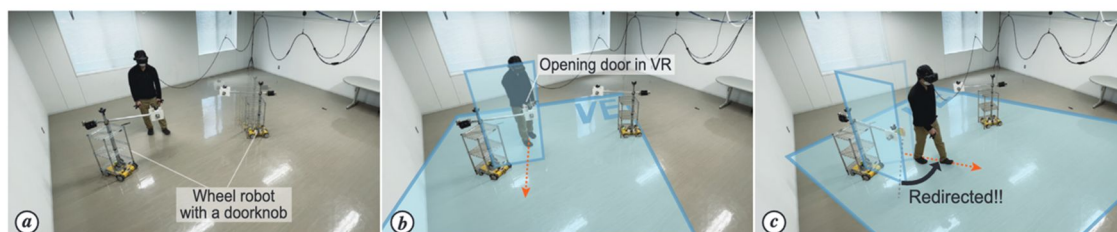


図 3 . Redi rectedDoor+を複数台用いたユーザの移動方向操作インタラクション例

以上のように, 複数のロボット型プロップを開発し, それらを用いて身体支持を始め, VR 内で行われる様々な重要インタラクション中の精度を向上させることに成功した.

その他, 検討中のものとしては, 自動的に姿勢を正すことができるタブレットスタンドや, VR 内での身体支持と地面起伏を再現できる杖型デバイス等の成果を得た (後日出版予定).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Yuki Onishi, Kazuki Takashima, Shoi Higashiyama, Kazuyuki Fujita, Yoshifumi Kitamura	4. 巻 -
2. 論文標題 WaddleWalls: Room-scale Interactive Partitioning System using a Swarm of Robotic Partitions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '22)	6. 最初と最後の頁 29:1-29:15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3526113.3545615	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 -

1. 著者名 Taichi Tsuchida, Kazuyuki Fujita, Kaori Ikematsu, Sayan Sarcar, Kazuki Takashima, Yoshifumi Kitamura	4. 巻 564
2. 論文標題 TetraForce: A Magnetic-Based Interface Enabling Pressure Force and Shear Force Input Applied to Front and Back of a Smartphone	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. of the ACM on Human-Computer Interaction, Vol. 6, Issue ISS	6. 最初と最後の頁 143-160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3567715	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 -

1. 著者名 Gomi Ryota, Takashima Kazuki, Onishi Yuki, Fujita Kazuyuki, Kitamura Yoshifumi	4. 巻 7
2. 論文標題 UbiSurface: A Robotic Touch Surface for Supporting Mid-air Planar Interactions in Room-Scale VR	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction	6. 最初と最後の頁 376 ~ 397
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3626479	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 -

1. 著者名 Gomi Ryota, Suzuki Ryo, Takashima Kazuki, Fujita Kazuyuki, Kitamura Yoshifumi	4. 巻 -
2. 論文標題 InflatableBots: Inflatable Shape-Changing Mobile Robots for Large-Scale Encountered-Type Haptics in VR	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 CHI '24: Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems	6. 最初と最後の頁 423:1-423:14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3613904.3642069	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Hoshikawa Yukai、Fujita Kazuyuki、Takashima Kazuki、Fjeld Morten、Kitamura Yoshifumi	4. 巻 30
2. 論文標題 RedirectedDoors+: Door-Opening Redirection with Dynamic Haptics in Room-Scale VR	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics	6. 最初と最後の頁 2276 ~ 2286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TVCG.2024.3372105	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5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Yukai Hoshikawa, Kazuyuki Fujita, Kazuki Takashima, Morten Fjeld, Yoshifumi Kitamura
2. 発表標題 Demonstration of RedirectedDoors: Manipulating User 's Orientation while Opening Doors in Virtual Reality
3. 学会等名 SA '22: SIGGRAPH Asia 2022 XR (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryota Gomi, Kazuki Takashima, Kazuyuki Fujita, Yoshifumi Kitamura
2. 発表標題 A Triangular Actuating Device Stand that Dynamically Adjusts Mobile Screen 's Position
3. 学会等名 Adjunct Proc. of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土田太一, 藤田和之, 池松香, Sayan Sarcar, 高嶋和毅, 北村喜文
2. 発表標題 TetraForce: スマートフォンの表裏両面に対する垂直・剪断方向の力を入力可能な磁気式インタフェース
3. 学会等名 第30回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS '22)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yukai Hoshikawa, Kazuyuki Fujita, Kazuki Takashima, Morten Fjeld, Yoshifumi Kitamura
2. 発表標題 Demonstration of RedirectedDoors: Manipulating User 's Orientation while Opening Doors in Virtual Reality
3. 学会等名 SA '22: SIGGRAPH Asia 2022 XR ((国際学会))
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryota Gomi, Kazuki Takashima, Kazuyuki Fujita, Yoshifumi Kitamura
2. 発表標題 A Triangular Actuating Device Stand that Dynamically Adjusts Mobile Screen 's Position
3. 学会等名 Adjunct Proc. of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '22) (国際学会)
4. 発表年 2022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	伊藤 雄一 (Itoh Yuichi) (40359857)	青山学院大学・理工学部・教授 (32601)	
研究分担者	藤田 和之 (Fujita Kazuyuki) (70835545)	東北大学・電気通信研究所・助教 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------