

# 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

鄒 一先<sup>†</sup>, 高嶋 和毅<sup>†</sup>, アンソニー タン\*, 藤田 和之<sup>†</sup>, 北村 喜文<sup>†</sup>

**概要:** 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の開発に向けた示唆および課題をまとめる.

## 1. はじめに

部屋規模のトラッキングエリアを持つルームスケール VR と呼ばれるセットアップが普及し始めてきた. ルームスケール VR では, ユーザによる実際の歩行や全身運動が VR のアクティビティに反映されるため, 体験の質や没入感が向上する. しかし, それゆえに, ユーザに空間の広さや構成をより正確に理解し体験してもらうことがより重要になる. 例えば, VR 内に壁が存在している際に, ユーザの体がそれをすり抜けてしまうのであればリアリティや没入感は大きく低下してしまう. そのため, 人の空間行動と密接に関わる空間のインフラ (壁やドア等の境界) を適切に表現することができる触覚提示の必要性が増してくると考えられる. しかし, 部屋規模の計測空間を持つルームスケール VR 全体に触覚を提示しようとする研究例は少なく, その方法論はまだ明らかにされていない. 本研究はこれの解決法を探ることを目的とする.

ユーザに VR 内のモノの触覚を提示するには様々な方法があり, 代表的なものの一つにパッシブハプティクスがある. これは, VR 内のモノと同等の物理物体 (プロップと呼ぶ) を同位置に配置することで, ユーザが VR のモノに接触する際に, その物理的なフィードバックを与えることができるものである. この方法は, 簡単でありながら効果が大きいために多くの研究実績があり, 体験の没入感や臨場感を有意に増加させるといった報告もある[6,9]. また, 現実世界に配置するプロップは VR で表示している物体ほど高精細でなくても十分な効果が得られるとも言われている[12]. しかしながら, この方法は, バーチャルな世界が大きく, また複雑になるほど, 設置コストが高くなるという欠点がある. プロップの準備に労力が要するうえ, VR のシーンが変更されれば別のプロップを準備し配置し直さなければならない. この労力を軽減するために, 少数のプロップ

を再利用して必要な場面 (実際に触れる可能性があるとき) にだけ配置して触覚を提示する方法があり, これは, 遭遇型触覚提示と呼ばれる. TurkDeck [4]はその代表的研究で, 人手 (ヒューマンアクチュエータ) を使って大型の壁プロップを数十個連携して移動させ, HMD ユーザが通るであろう場所の壁やドア等の空間インフラの触覚を表現している. しかし, 1 人のユーザの体験のために 10 人以上もの人手を要するという欠点がある.

そこで本研究では, ルームスケール VR における空間インフラの触覚を, 自動的に作り出すための方法論を検討する. 我々のアプローチは, 壁型の物理プロップをユーザの行動に応じて自走させ, VR 内の壁やドア等に対する触覚をユーザに遭遇的に提示することである. 図 1 に提案システムを運用した例を示す. 本研究では, まず, 空間インフラを表現するに適した壁型プロップを設計し, その後, 典型的な 4 壁の室内テスト環境において, ユーザの動きを事前に予測するための予測アルゴリズムや, 複数枚の壁型プロップの状態管理や移動制御について検討する. シミュレータによってアルゴリズムや条件の妥当性を検証し, 最終的には, 提案システム (空間インフラの触覚提示あり) とベースライン (空間インフラの触覚提示なし) を, ゲームシナリオを用いたユーザスタディによって比較検証することで, 提案手法の有用性と課題を議論する.

なお, 本研究における触覚提示とは, VR に存在する境界の存在の事実を, 触覚をもって確認できることとし, テクスチャの違いや重さなどについては検討しない. また, “壁面へのタッチ” は, 日常生活において頻度が高いとは言えないが, VR での FPS (First-Person Shooter) や探索ゲームなどにおいては, 空間の構造を理解するために自然に用いられる. また, ユーザがコンテンツ制作者の想定する境界をすり抜けて移動できてしまうことは, 臨場感だけでなく安

<sup>†</sup> 東北大学 電気通信研究所

\* Faculty of Information, University of Toronto

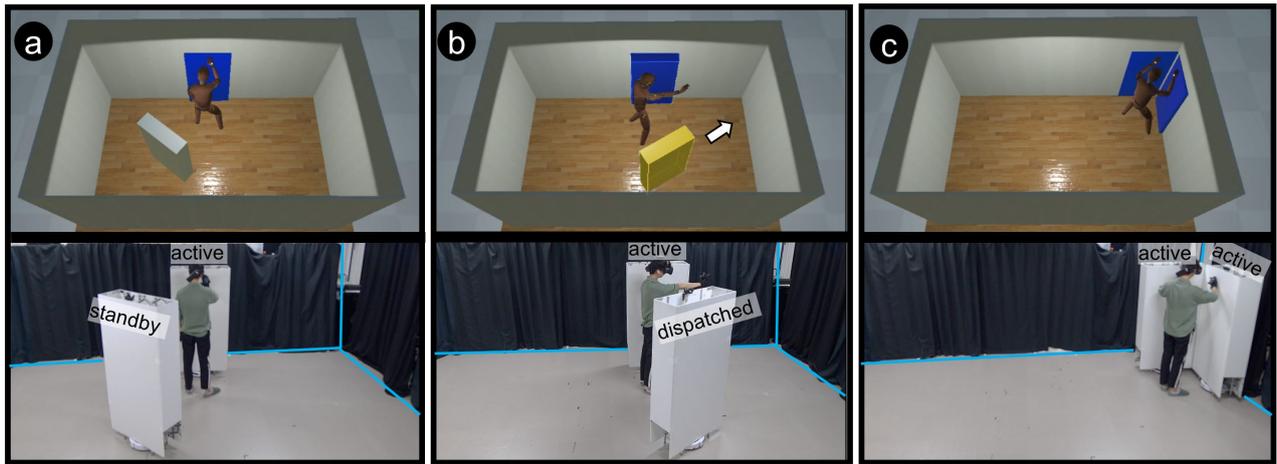


図 1 提案システムの動き：上段：VR 内でのユーザ；下段：HMD ユーザと物理壁プロップ。(a)アクティブな壁プロップ（青色）は、正面奥にある VR 壁面の一部の触覚を提示し、他方の壁プロップはユーザ周囲に配置されスタンバイ状態にセット（灰色）されている；(b) ユーザが右側の壁面に向かった際、スタンバイ状態の壁プロップはディスパッチ状態（黄色）となり、右側の壁へ移動を開始する．ユーザは正面奥の壁から離れていないために、既にアクティブにセットされていた壁プロップはそのまま継続してアクティブ状態でユーザに追従して正面奥の壁面を表現し続ける；(c)二つの壁プロップがアクティブ状態になりコーナーの形状を作り、その触覚を提示する．

全面上重大な問題になり得るため、境界を触覚も含めて正確に表現することは重要である．その他、壁面のスイッチへのタッチや、ドアの開閉、ホワイトボードに文字を書くなど、鉛直面に対するインタラクションの機会が多く、壁面の触覚を強化してリアリティを高めることは、潜在的にそれらのインタラクションの強化にもつながると考える．

## 2. 関連研究

VR 内の触覚提示の研究例は膨大であるが、ここでは、ルームスケール VR での触覚提示と、本研究で用いるロボットによる動的な空間構築に関して議論をまとめる．

### 2.1 遭遇型触覚提示

ユーザが VR 空間のモノに触れようとしたときにだけシステムが物理プロップを適宜配置して触覚を与えることは遭遇型触覚提示(Encounter-type Haptic Device など)と呼ばれる．これは、接地型と非接地型に大別される．接地型の遭遇型触覚デバイスは、固定されたロボットアーム等になんらかの物体を取り付け、それをユーザが触れそうな場所に動的配置するものである．この方法は古くから成功しており、ロボットアームの先端に取り付ける形状が変われば、異なる形状の触覚をユーザの指に提供することができる[5]．Kim ら[8]は、このコンセプトを拡張して、タブレットサイズのプロップでホワイトボードサイズの VR コンテンツの触覚フィードバックを再現することに成功している．なお、この接地型は、ロボットアームなどが地面に固定されるため、ルームスケール VR には適用し難い．Vonach [18]らはこの問題に取り組み、ロボットアームを用いた遭遇型触覚デバイスと全方位トレッドミルを用いた歩行体験を組

み合わせたルームスケール VR を提案している．しかし、歩行が自然ではないことと、触覚提示領域も依然として小さいことが欠点として挙げられる．TilePop は空気で膨らませることができる立方体のプロップを 27 個（立体的に 3x3x3 の配置）用いて、VR 内の大きなオブジェクトの凹凸を物理的に表現することができるシステムである[15]．遭遇型触覚提示のコンセプトはあるものの、空気でプロップを膨らますのに長時間の待ち時間が発生するという欠点がある．また、デバイス全体が接地されているために触覚提示範囲は限られる．しかしながら、ユーザが体重を預けることができ、また変形パターンも多いため、従来のパッシブプロップを強力に拡張している．

非接地型の遭遇型触覚提示方法の研究の大半は、ドローンを用いて物理フィードバックを生み出す研究である（例えば[1]）．これはルームスケール VR に有望なアプローチであるが、騒音も大きく、周囲の気流が大幅に乱されるために、ユーザへの体験への影響が危惧される．本研究で提案する自走壁型プロップは、非接地型触覚提示デバイスに相当するが、ドローンより安定した接触面の提供が可能であり、気流も乱すことはない．TurkDeck [4] では、ヒューマンアクチュエータらが、物理プロップを手動で事前に必要な場所に配置し、それらを循環利用し続けることで、広範囲のルームスケール VR の触覚体験をユーザに提供している．プロップは、時間をかけて事前に指示通りに配置されていることが多いため遭遇性の要素は小さい．この研究では、7分間の一人の VR 体験のために、65 個の大型プロップを 10 人の労働者により移動させている．労働コスト

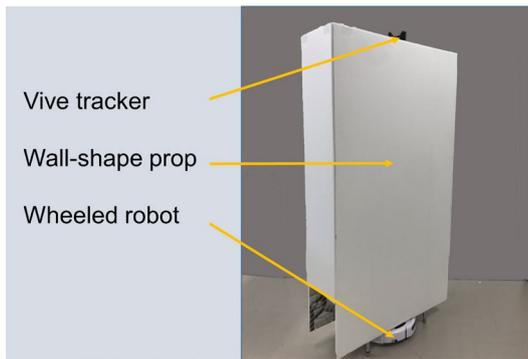


図 2 自走壁型プロップの実装例

が高いだけでなく、単純な力作業の繰り返しを強いるため労働者の確保にも課題はあると見られる。我々は、TurkDeck に刺激を受けつつも、複数のモバイルロボットを循環させて VR における歩行感覚を支援するシステムなどのアイデア[20]にならない、モバイルロボットを効果的に用いることで、人手なしでルームスケール VR の空間インフラの遭遇型触覚提示を目指す。

## 2.2 パッシブハプティクス

典型的なパッシブハプティクスは、表現したい VR オブジェクトと同サイズのプロップを現実世界に配置することである[6,9]。このアプローチは、小規模な VR であれば有効であるが、オブジェクトが増えた際に準備すべきプロップが多く、コストがかかる。そこで、研究者らは、そのような課題を解決するために、再利用できる仕組みを提案している。その一つはリターゲットング[2]と呼ばれる視覚覚における錯覚である。ユーザの腕の動きをトラッキングし、実際の腕の動きよりも大きく（または小さく）動いている映像をユーザに見せることで、VE 内での腕の動きを錯覚させている。これにより、現実では常に 1 つのプロップを触っているにも関わらず、ユーザは VE 内の複数のバーチャル物体をそれぞれ触っているかのように錯覚する。その他、パッシブハプティクスの特徴として、VR 内の物体と少し異なる形状の物理プロップでも十分な触覚を提供できることも明らかになっている[12]。

## 2.3 協調ロボットによる空間構築

本研究では、複数台の壁型プロップをロボットにより連携させながら自走させるものであり、過去の協調型ロボット型ディスプレイ研究実績に立脚したものである。Shape-Shifting Wall Display [14] は、モバイルロボット上に設置された複数の壁面ディスプレイが連携し、表示コンテンツやユーザ数などに応じて、壁面ディスプレイのレイアウトや形状を動的に変更することができる。また、ロボットタイヤを複数個循環利用することで永久にその場で様々な方向に移動できる床を作る研究などもある[20]。本研究では、これらの協調的なロボットのアイデアをもとにして、複数台のプロップを高度に連携させ、広い範囲でも効果的な遭

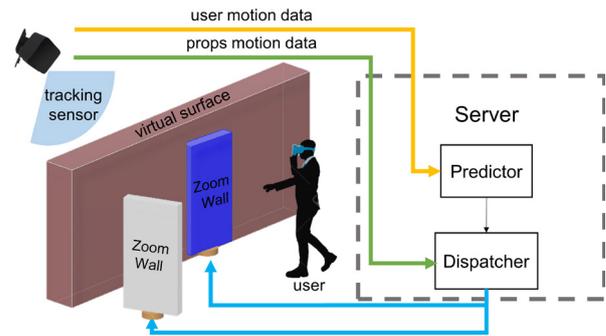


図 3 提案システムの概要と構造

遇型触覚提示を目指す。

## 3. 提案システムの設計と実装

本章では、ルームスケール VR での空間インフラを表現するための自走壁型プロップの設計、それらの制御や安全性の確保、およびユーザの行動予測に基づくプロップの配置アルゴリズムについて述べる。

### 3.1 自走壁面プロップの設計

壁プロップは、空間インフラを部分的に表現するものである。我々は人間工学などを参考にして、プロップのサイズは人と同サイズとし、両手を前方に伸ばしたときに触れることができる程度の幅と、足首から頭部までの高さを持つようにした。プロップは、図 2 に示すように二つのパーツからなり、軽量のスタイロフォームボードを用いて壁面に相当する部分を作り (H 150 cm × W 80 cm × D 20 cm)、その下にモバイルロボット(Roomba)を配置し、無線コマンドによる移動機能を実装した(図 2)。ユーザとの衝突が万一発生した際の衝撃を最小限にするために、壁プロップは軽量に設計されている。結果として、現在のプロトタイプでは 11 kg 程度の重量であり、人が壁に触れたり軽く叩く程度の力では揺れないが、押し込むような動作をした場合には倒れる恐れがあり、そのような用途には向かない。モバイルロボットにはルンバを用いるため、壁プロップは、二輪駆動による 2 自由度の動きとなる。そのため、壁プロップは表と裏の両面にボードを配置し、プロップが回転する機会が少なくなるようにした。システムが壁プロップの位置を計測するために Vive トラッカを上部に取り付けてその位置と向きを管理する。モバイルロボットの移動速度には仕様上の最高速度である 0.5 m/s とする。これは、室内で人の歩く速度 (1m/s 以上) に比べると遅く、大きな制限であるが、人の近傍で移動することを考えると、安全上妥当な速度である。

### 3.2 システムの全体像

システムは、VR 世界をレンダリングする視覚表現部分と自走壁型プロップによる触覚表現部分の両方を管理する。そのため、システム全体としては、VR 内の空間インフラ(壁やドアなど)の位置は既知である。本研究では、ユー

ザの位置に応じて必要な場面のみ壁プロップを提供するような仕組みを導入することで、少ないプロップでも質の高いルームスケール VR 体験を提供したい。これに向けて、図 3 に示すような構成を持つシステムを構築する。図中の茶色の壁は、ユーザがタッチしようとしている VR 内の壁面である (HMD ユーザにだけ見える)。本来であれば、そこに物理的な壁は存在しないため、ユーザがその壁に触っても手や体はすり抜けてしまう。それを防ぐために、同図に示すように、ユーザが触れようとしている VR 内の壁と同じ場所に壁型プロップを動的配置する。これ自体は遭遇型触覚提示の基本的な考え方であるが、本研究ではそれを遅延なく広範囲の VR で実現するために、ユーザの頭部の移動情報を常に計測し、ユーザが触れようとしている壁面を予測する Predictor と、その予測結果および現在の壁プロップの配置から適切な壁プロップを移動させる Dispatcher の二つのアルゴリズムを設計する。次章で詳しく述べるが、本研究では、Predictor として、基本的なバウンディングボックスを用いた方法とバウンディングボックスと機械学習を併用する 2 つの方法を検討した。Predictor がユーザの各種行動情報からユーザが触れそうな壁面を特定できれば、Dispatcher にその壁面 ID を指示する。ID を受け取った Dispatcher は、ユーザ周囲に追従している壁プロップの中から最も適した壁型プロップを選択して、それを目的地まで安全に移動させる。この時、最も早く目的地に到達できるかどうか、またできるだけ少ない回転運動で到達できるかを考慮して選択される。

### 3.3 自走壁プロップの状態管理

複数の壁プロップが同時に Dispatcher により選択されることも多いため、それらを安全に混乱がないようにするために、壁型プロップは、“スタンバイ”、“アクティブ”、“ディスパッチ”の三つの状態の一つに設定されるように管理される。アクティブとは、当該壁プロップは VR の壁面の一部分に既に配置されており、触覚をユーザに提示できる状態のことである (図 3 中の青色の壁)。この時、ユーザがその壁面に沿って歩いた時は、その壁プロップは壁面上を並進して触覚を提示し続ける。例えば、暗い部屋に入ったときにユーザが壁伝いに歩いている場合などにこのような動きとなる。スタンバイ状態では、その壁プロップは VR の壁面の一部にはなっておらず、必要な場面で瞬時にアクティブ状態に遷移できるようにユーザの周囲に配置されユーザに追従する (図 3 中の灰色)。この時、不用意な壁同士の衝突や干渉を避けるために、既にアクティブになっている壁プロップを避けるようにユーザの周辺に配置される。基本的にスタンバイ状態にある壁プロップはユーザの周囲 (ユーザが手を伸ばしても届かない場所) に配置されることになるが、ユーザと壁との距離や周囲のアクティブ状態の壁の存在などによって適宜微調整される。スタンバイ状態にある壁プロップを Dispatcher が指定すれば、その壁プ

ロップはディスパッチ状態となり、目的地まで移動が開始される。ただし、ユーザの行動によっては、ディスパッチ状態からアクティブに遷移することもあれば、スタンバイ状態に戻ることもある。また、アクティブ状態からは、ディスパッチ状態またはスタンバイ状態のどちらへの遷移もあり得る。

### 3.4 移動経路計画と安全対策

ディスパッチ状態の壁プロップは、Reciprocal Velocity Obstacles Algorithm [16] を利用し、それぞれの壁プロップがユーザや他のプロップとの衝突を避けるような経路がとられる。これを選択した理由は衝突を避けることに長けていることと、シンプルで高速化が狙えるからである。このアルゴリズムでは、それぞれの壁、ユーザの位置やスピードを常に観察し、衝突を事前に避けるように経路が計画される。経路決定後は、PID 制御によって壁プロップは目的地まで到達する。先にも述べたが VIVE トラッカにより移動と位置制御をすると 2cm 程度の計測誤差は発生しうするため、それを見越した精度目標に設定している。また、同様の理由で、システムの性能のみでは 100% の安全性は確保できない。そのため、壁プロップが予期せぬ移動を始めた際に、実験者またはオペレータが即座にシステムを停止するためのキルスイッチを設置した。キルスイッチ自体を HMD ユーザのコマンドとして持たせることもできる。このボタンを押すと、移動している全ての壁プロップは強制的に停止し、HMD ユーザには VR 内にすべての壁プロップの位置が可視化される。この可視化は、システム停止後にユーザがプロップを視認できないことによる衝突などを防ぐものである。以上で示したように、壁プロップの制御は安全かつ安定的に設計されている。次に、それらの壁プロップの移動の方針を決定する Predictor について述べる。

## 4. 予測アルゴリズムの設計

Predictor では、VR を体験するユーザの動きからどの壁面を触ろうとしているのかを予測する。しかし、ユーザの動きは VR コンテンツやアプリケーションによっても異なるため万能の予測をすることは困難である。そこで本研究では、4 つの壁に囲まれた基本的な部屋でユーザが壁面に沿って空間の構造を探索するシーンを題材として、基本的な行動予測アルゴリズムが遭遇型触覚提示の実現に向けてどのように利用できるかを議論する。

本研究では、2 つの予測アルゴリズムを検討した。1 つは、ユーザの周囲にバウンディングボックス (仮想的な立方体又は直方体) を定義し、リアルタイムでユーザの触る可能性の高い壁面を予測する方法である。もう 1 つは、そのバウンディングボックスに加えて、ユーザの室内での動きを事前に学習させておいた機械学習器を併用する方法である。後者を設けたのは、前者のアルゴリズムでは、自走壁プロップを減らした場合に、特に長距離の移動が発生す

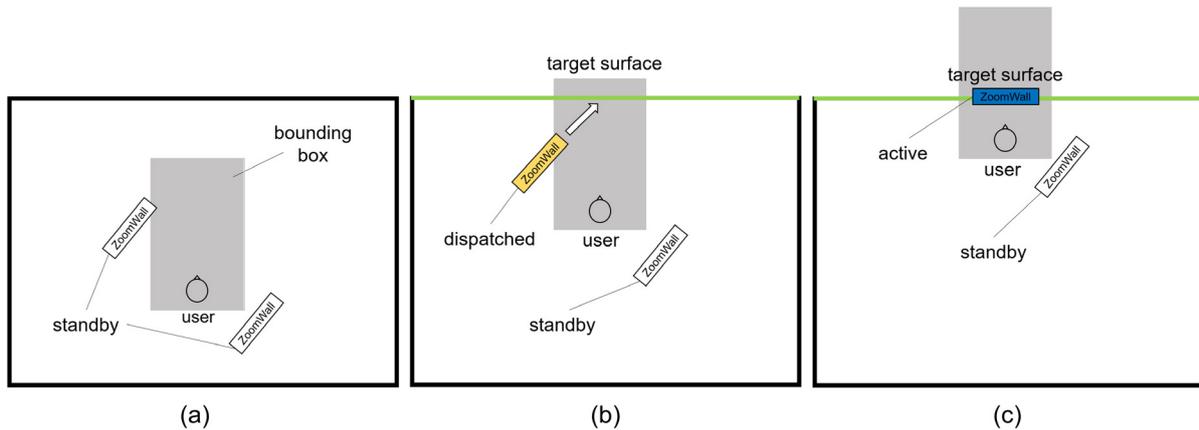


図 4 バウンディングボックス Predictor と Dispatcher の挙動 (a) ユーザのバウンディングボックス周辺に壁プロップはスタンバイ状態で配置される; (b) もしユーザが VR の壁面に近づいたら (バウンディングボックスと面が重なったら), その面がタッチされると予測し, Dispatcher は適切な一つの壁プロップを送る; (c) その壁プロップはユーザ正面の領域に配置されアクティブな状態 (触覚を提示) となる. 他の壁プロップはスタンバイ状態で周辺に待機する.

るケースで壁プロップの配置に大きな遅延が発生することが判明したためである. 学習の必要性や精度など, それぞれ一長一短の特徴を持つが, 遭遇型提示を実現するための基本的なアプローチであり, その有用性を検証しておくことは今後複雑な構造を持つ部屋への展開を考えると有用になると考えた. なお, アルゴリズムの挙動や数値的解析は, 実機と同システム上で動作するシミュレータで検証した.

#### 4.1 バウンディングボックス Predictor

図 4 に示すように, ユーザの周囲に仮想的なバウンディングボックスを定義し, その範囲内に VR の壁面があればユーザはそれらの壁面をタッチすると予測するシンプルなアルゴリズムである. 本研究においても, 部屋のサイズ等をもとにして, 長方形のバウンディングボックスがユーザの前方を中心に囲むように配置されている (図 4a の灰色部分). ユーザが移動して, このバウンディングボックス内に VR の壁面等が含まれれば, システムは, ユーザはその面を触ろうとしていると判断する. タッチする可能性が高い面が特定された後は, 図 4b に示すように, 適切な (近い) 壁プロップがディスパッチ状態に指定されて目的地まで移動を開始する. そして, 最終的には図 4c に示すように, ユーザの正面に配置され, VR の壁面の触覚を提示する. 図 4c の状態でユーザが横に移動したとすれば, アクティブ状態にある壁プロップもそれに追従する. ここでの Predictor の出力は, 5 つの条件 (4 つの壁のどれか, またはニュートラル) のいずれかである. なお, 図 4 に示すような挙動は理想的なものであり, 実際には Predictor と Dispatcher だけで成り立つわけではなく, 衝突を回避する RVO アルゴリズムによる経路選択によって経路は変わる可能性はある.

このバウンディングボックスの方法は, シンプルながら安定稼働するが, 壁プロップの枚数を少なくした際に, 壁プロップの配置が極端に遅延することが予備的検討で分か

っている. これを回避するために, 次節で示すように, ユーザが向かいそうな壁をより早く予測し, そこに優先的に壁プロップを配置するような Predictor を検討する.

#### 4.2 SVM+バウンディングボックス Predictor

上記のバウンディングボックス Predictor は狭い空間であればよく機能するが, 優先順位をつける仕組みが弱く, バウンディングボックスが 2 つの壁面を捉えた際や, ユーザが遠方にある壁面に向かって歩いている際に壁プロップの配置が遅れやすかった. ユーザが明快な意図をもって進行方向先の壁に触れようとするのであれば, ユーザが歩き始めた際にその先にある壁面を優先的に選択するような仕組みが必要である. これには, ユーザの頭部の向きや歩き始めた方向を計測することで大まかにその行先を予測することはできるが, あまりに単純な動作特徴量から予測しようとすると誤りも多く, Dispatcher による無駄な壁プロップの選択と解除などが頻発し, 壁プロップの不要な振動が発生しやすかった. そのため, ユーザが持つより多くの行動情報から行先を予測するアルゴリズムを構築しなければならないが, 多くの特徴量からルールを構築するのも手間がかかるうえ局所的な対応になりかねない.

そこで, 室内での人の行動パターンを事前に学習して予測モデルを構築しそれを利用することとした. 本研究で提案するモデルは, ユーザの HMD のセンサから取得できる 1 秒ごとの移動情報をもとにして, そのユーザがどの面をタッチしようとしたのかを予測するものである. 検証や学習器はすべて, 障害物のない 4 面の壁で囲まれた 4 m×3 m の部屋で実施したため, 今回の SVM は, 過去の 1 秒の情報から次に向かう面を予測する 5 条件 (4 面の壁+ニュートラル) を識別するものである. SVM で利用する行動パラメータは, ユーザの位置 (PosX, PosZ), 頭部の向き (DirX,

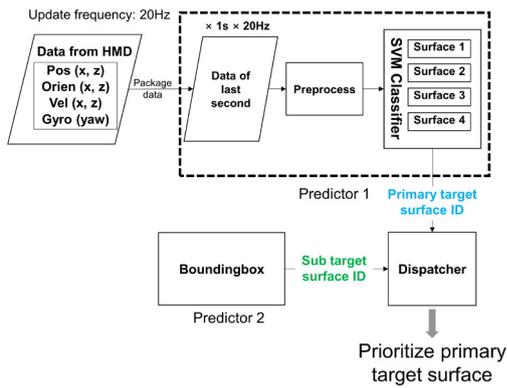


図 5 SVM とバウンディングボックスによるタッチ面優先選択アルゴリズム

DirZ), 歩く速度 (VelX, VelZ), と角速度(GyroY)の7変数であり, 全て HMD に装着されたセンサにより 20Hz で計測される. 図 5 に SVM モデルの構造を示す.

学習データは, 本研究とは関係のない3名の行動から収集した. 参加者は Vive トラッカを頭部につけた状態で, 部屋の中を歩き回り, 壁を触るという行為を繰り返す. 単調な動きではなく自由自在に動き回ってもらった. ただし, 定期的にその時点で向かう面の番号をハンドヘルドデバイスのボタンで指定してもらい, これを教師データとした. 10 分間の行動収集を 3 セット繰り返した (3 名分で 90 分程度). 得られた教師データと 7 つの特徴量を使って SVM 学習モデルを構築した. 5 条件 (4 つの面と 1 つのニュートラル条件) の識別精度を 10 分割交差検定した結果, 識別精度の平均は 0.89 であった. これは完璧ではないが, 経験的に, 頭部方向等の単純な特徴量のみを使った予測より十分に高い精度と考えた.

### 4.3 シミュレータによる Predictor-Dispatcher の評価

4.1 と 4.2 で設計した 2 つの Predictor の性能を Dispatcher も含めてシミュレータで評価した. これには, 実際に室内を歩く人のデータを計測して, それらをシミュレータに投入し, 2 つの Predictor によって壁プロップがどの程度の早さで配置できるかを計算した. 実際の人のデータとして, 別の 5 人に依頼して, 同じ 4 m×3 m の部屋の中を, 自然なスピードで次に示す 4 つの歩行パターンを実施しながら手で壁に触れてもらった. パターンは, 室内を時計周り, 反時計周り, 正対する二面の往復 (長辺と短辺), の計 4 つである. (反) 時計周りでは, 4 つの壁を順に触っていくものであり, 次のターゲットが近く, 壁プロップの移動距離も短い. 一方で, 往復パターンでは, 次のターゲット位置が離れるため, 遅延が発生する可能性が高くなる. それぞれ 5 回の繰り返しをもらい, これらのデータをシミュレータに投入し, 次の 4 つの条件の遅延時間を調査した.

- バウンディングボックスを使った 2 枚の壁プロップ条件
- バウンディングボックスを使った 3 枚の壁プロップ条件

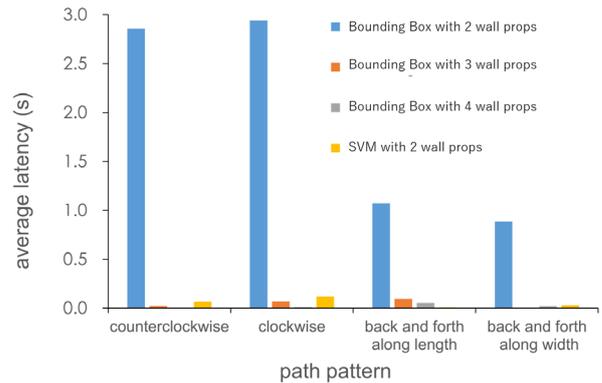


図 6 シミュレータによる提案システムのプロップ配置遅延時間の検証結果

- バウンディングボックスを使った 4 枚の壁プロップ条件
- SVM+バウンディングボックスを使った 2 枚の壁プロップ条件

遅延 (待ち時間) は, ユーザが目的地に到達してから壁プロップが来るまでにどの程度待ったかを計算したものである. なお, この実験では, 5 人の被験者には自然な歩行速度で歩いてもらっていたことから, 人と同程度の速度を持つロボットを使う想定でのシミュレーション結果を示す. つまり, 遅延の絶対値はロボットの性能に依存するものであるが, 条件間の相対的な差を検証することで, 4 つの条件の有効性を議論することができる. 図 6 に結果を示す. バウンディングボックスで 2 枚の壁プロップを利用する条件は, 他の条件に比べて極端に悪く, その他の条件であれば, たとえアクチュエータの制約があったとしても, 工夫次第で遅延なく壁プロップを配置できる可能性が示された. バウンディングボックスのアルゴリズムでも 3 つ壁プロップを使えば十分な応答を実現できることや, 現状のテスト方法においては, 4 つの壁プロップを導入する必要ないことも分かった. 以上のシミュレーションにより, Predictor-Dispatcher およびハードウェアの現実的な選択肢を確認することができたため, これに基づき, 実機によるユーザスタディを実施した.

## 5. ユーザ体験の検証

### 5.1 概要

実際のセンサとアクチュエータの環境で運用し, その時の主観評価および壁プロップ配置待ち時間を評価する. 先のシミュレータでは理想的なロボットを用いたが, 我々が利用するルンバの最高速度は 0.5 m/s である. そのため, 人が歩く速度をそれと同等かやや遅い程度に制限する必要がある. 本研究では, 過去の同様の研究にならない (例えば, [4]), ゲームシナリオを用いて歩行速度に制限をかけた.

本実験では, 先行研究や先のシミュレータの検証結果に基づき, 次の 2 つの仮説を中心に検証する.

1. 提案システムの触覚提示により, ユーザはより高い臨

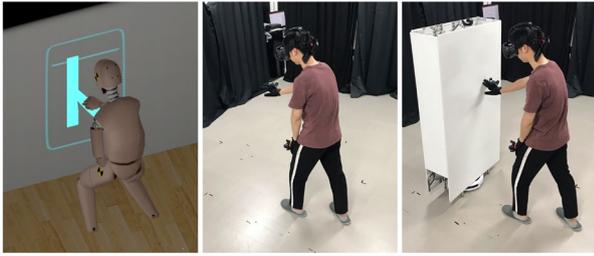


図 7 ユーザ体験スタディの様子 (a) VR 内でロックを解除する VR 内でのユーザ: (b) ベースライン条件 (触覚提示なし) での現実世界のユーザ: (c) 提案システム条件 (触覚提示あり) での現実世界のユーザ

場感と楽しさを得ることができる

- ユーザの歩行速度をゲームにより制限すれば、提案システムにより遅延のない触覚提示が可能である

### 5.2 実験参加者

実験参加者は、本研究のことを全く知らない大学生または大学院生 12 名 (うち女性 3 名) であった (22 から 28 歳; 平均は 24.8 歳). 参加者のうち 5 名が過去に VR を体験したことがあるが、日常的に使っている人はいなかった。

### 5.3 タスクと実験計画

本実験では、ユーザの歩行速度を 0.4 m/s に制限するために、空間内を慎重に歩き、次々に簡単な課題を達成していくエスケープルームゲームを題材とした。環境は、4 m×3 m の 4 つの壁面を持つ環境である。ただし、照明はなく、参加者は、ランタンを持ち、その光で足元を照らしながら壁面を順次たどっていく。そして、壁面に表示されているパターンを手でなぞることで、ロックを解除していく。その様子を図 7 に示す。ロック解除の機会は 5 回あり、その際に壁プロップが触覚を提示することになる。ロック解除パターンは、一つを終えたら次が順に出現する。また、歩行速度が設定よりも速くなるとデーモンがうめき声をあげる。デーモンが起きればゲームはクリアできないため、ユーザはゆっくりと歩きながらデーモンを起ささないようにして、ロックを解除し続けることがクリアの要件になっている。本実験における比較は、次の 3 条件である。

- 壁プロップを用いない (触覚提示なし) ベース条件
- バウンディングボックスで 3 つ壁プロップ条件
- SVM+バウンディングボックスで 2 つ壁プロップ条件である。後者の二つの条件は、同等のレスポンスと期待されるが、ベース条件との比較により、提案システムによって体験の質が向上したかどうかを検証する。

### 5.4 測定

仮説 1 への回答をするために、主観評価として、臨場感について Witmer and Singer's classic Presence Questionnaire [19] から没入 Involvement と自然さ Naturalness の二つの項目をピックアップして 7 段階で回答を求めた。また、独自の質問として、どの程度楽しかったかについて 2 つの質問

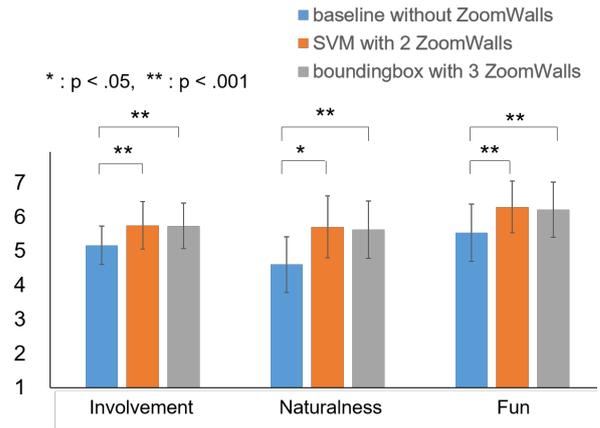


図 8 ユーザの主観評価結果.

を設けた。仮説 2 に対して、ユーザが到達して面を触る時間と壁プロップが配置される時間の差 (遅延) を検証した。もし壁が先に配置されていればこの時間差は 0 となる。

### 5.5 手続き

実験概要や注意点を説明した後参加者は、HMD を頭部に装着し、また両手に Vive トラッカ付きのグローブを装着する。このグローブの座標は、ロック解除パターン時と遅延の計測に利用される。また、モバイルロボットからのノイズを軽減するためにノイズキャンセリングヘッドフォンを装着してもらい、かつ実験シナリオに適したサウンドを出力した (デーモンの叫び声など)。参加者は、歩行速度の制約とロックパターンについて十分な練習を積んでから本番に入った。実験は、実験者とアシスタントで実施し、アシスタントは常にシステムの挙動を監視し、危険や参加者からの申し出があればシステムをいつでも止めることができた。ターゲットとなるロック解除パターンはランダムな順で提示される。なお、このタスクでは、壁が配置されるべき VR の壁面が明らかになっているが、実験時の壁プロップの配置にはその情報は一切使っておらず、Predictor-dispatcher のみを利用した結果である。上記の 3 の条件の提示順は、12 人の参加者間でカウンターバランスをとった。実験後には、総合インタビューを実施し、提案手法全体や今後の改善などについて回答してもらった。

### 5.6 結果

#### 5.6.1 主観評価

実験参加者は、12 個の質問を条件毎に回答した。12 個は、3 区分があり、6 個の質問が Involvement、4 個の質問が Naturalness そして最後の 2 つの質問が楽しさについてであった。我々はそれぞれの区分の平均値を解析するにあたり、まずデータの正規性を確認したところ (D'Agostino and Pearson's の方法) すべてにおいて正規性が見られた。そのため、三つの質問区分について 3 条件間の比較をするための一要因分散分析を実施した。二つの壁プロップの条件は、図 8 に示すように、スコアが同等であるため比較せず、ベ

ースラインとそれら二つの提案システム条件の比較のみ実施した。その結果、2つの壁プロップ条件はベースライン条件より有意に高い没入 Involvement が得られた (SVM vs base:  $F_{(1,11)} = 32.2, p < .001, \eta^2 = .745$ , Boundingbox vs base:  $F_{(1,11)} = 59.9, p < .001, \eta^2 = .845$ )。また、同様の傾向が自然さの区分にもみられた (SVM vs base:  $F_{(1,11)} = 15.2, p < .005, \eta^2 = .581$  and Boundingbox vs base:  $F_{(1,11)} = 31.9, p < .001, \eta^2 = .744$ )。楽しさについての質問についても同様に、提案システムがベースライン条件より有意に高い結果が得られた (SVM vs base:  $F_{(1,11)} = 19.8, p = .001, \eta^2 = .643$  and Boundingbox vs base:  $F_{(1,11)} = 12.5, p < .001, \eta^2 = .533$ )。全体的に、壁プロップを利用することはポジティブな結果をもたらしたといえる。楽しさについては、10人のヒューマンアクチュエータで得られた TurkDeck [4]と同様の結果であった。本研究と[4]はシナリオもVR世界の複雑さも全く違うものの、人手なしに質の高いフィジカルVRの環境を構築できる可能性を示している。以上の結果をまとめると、仮説1は支持されたと結論づけられる。

### 5.6.2 遅延

主観評価でポジティブな結果を示していることからわかるように、壁プロップの遅延はほぼなかった。提案するに2つの手法条件では、バウンディングボックス条件で平均0.09 secで、SVMを併用する条件では0.07 secであった。これらは、0.2sガイドライン [7]より遥かに良好な結果であり、ユーザの歩行速度を制限したとはいえ、安定した挙動を示せたと考える。同時に、歩行速度の制限を緩和できるかもしれないことも示唆している。本提案により遅延のない遭遇型触覚提示を実現できたため、仮説2も明確に支持された。

### 5.7 インタビュー

主観評価及び遅延の検証で示したように、提案システムの壁プロップによるVRの壁に対する触覚提示は全体的に肯定的であり十分な有用性と可能性を確認することができた。また、歩行速度制限については、ゲーム体験の一部として取り入れていたため目立った不満はなかった。楽しかったという意見は全員から出ており、参加者の中には、将来のFPSゲームでの利用を期待していたものもいた。全体的に本提案は肯定的であった一方で、以下のように、今後の研究の方向性を示唆する指摘もあった。

#### 5.7.1 ノイズ

4/12名の参加者が、ルンバの移動音がノイズとして聞こえ、体験が阻害されたとコメントした。ノイズキャンセリングヘッドフォンだけでは不十分であった場面もあった。ルンバのモーター音だけではなく、床とのグリップ音も時折大きく（高速での反転など）発生していたために目立って聞こえてしまった模様である。アクチュエータの静音化やヘッドフォンの音量の調整などを工夫すべきと考える。

#### 5.7.2 物理プロップとVRの壁の位置のズレ

4/12名の参加者が壁プロップと視覚的に確認できるVR内の壁が完全に一致していなかったと指摘した。これはセンサドリフトおよびそれに影響を受けるPID制御によるもので、現在のような簡易的な空間位置計測システムを使う限りはゼロにすることは難しい。なお、この問題については、センサシステムの更新やハプティックリターゲットイング [2,3]など、錯覚によりこの問題を軽減する方法が有望と考えている。これは、ユーザの仮想の手の身体性が保たれれば、ズレを考慮した腕の動きに変化させてもユーザには気づかれにくいというものである。

#### 5.7.3 システムへの不安

6/12名の参加者が、自身の周囲で動く壁プロップの状況が把握できないことに心配や不安を覚えたと言語があった。ノイズがかすかに聞こえるために生じた懸念である。これは衝突の懸念や不安によるものであり、体験の質に影響する根深い課題である。被験者の中には、壁プロップの位置を半透明表示してはどうかという提案をする者もいた。

## 6. 議論

### 6.1 壁プロップの拡張

プロップは、本研究のように手袋をして表面のテクスチャを重要視しない場合は、スタイロフォームで十分であり、その形状は工作次第で様々なものができる。インフラという観点では壁だけではなく、ドアや窓を表現することも重要であり、現在の自走壁プロップを応用すればそれらも設計することができる。例えば、空間インフラとして重要なスライドドアは簡単に作ることができる。図9bにその一部を示している。ここでは、ユーザがドアノブに触れたときに、ロボットの移動によるパワーアシストでスライドドアを表現している。その他、壁プロップの回転を利用すると開閉ドアも表現できる。素材の感触なども含めた触覚を提示する場合は、異なる素材をプロップの両面に張り付けることなどもできると考える。その他、壁の高さを変えたり、天井を設けたりすることでより多様な触覚提示が可能である。このように壁だけではなく多様なプロップを導入する際は、現在のシステムの管理体制を更新し、優先順位やプロップの属性を加えることで対応できると考える。

### 6.2 アプリケーション例

本提案手法を利用する代表的なアプリケーションは、FPSゲーム、インテリアデザイン、VRトレーニングなど、高い没入とともに空間理解が体験の質を決定するものであると考える。いずれも、典型的なVRアプリであるが、従来のデスクトップVRではなく、ルームスケールVRになればその効果はより高まると予想され、今後の発展が期待できる。図9に、試験的に実装した一人称視点シューティングゲームを示す。これは、VRパークゲームのThe Void

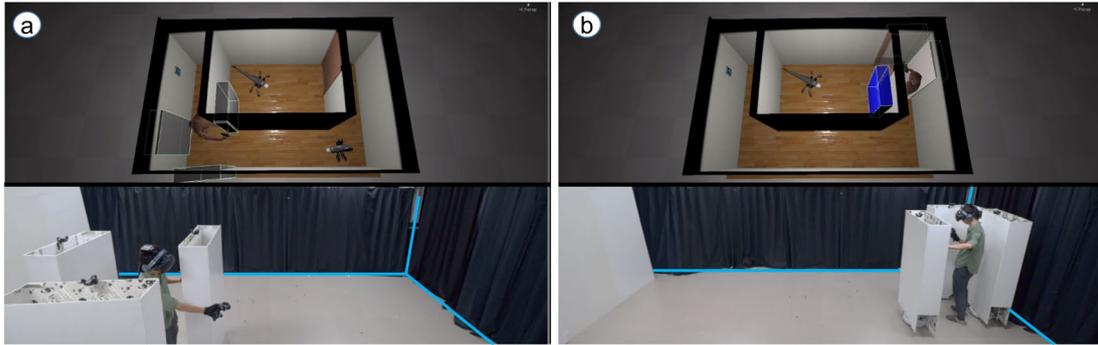


図 9 提案システムを使った FPS (一人称視点)のシューティングゲームの例. (a) 一人のユーザは細い廊下を進み、コーナーにて敵から身を隠している. (b) 廊下終点にて、小部屋へ入るためのスライドドアを壁プロップで表現している. (a), (b)ともに VR 内においても部屋の物理性や触覚フィードバックが体験の質を左右する

[17]を参考にしたものである. 図 9 キャプションに示すように, VR ユーザは, 自走壁プロップに周囲を囲まれているために, 相手との攻防時に壁に身を隠すことができる. また, 敵がいるかもしれない小部屋に入る際に, スライドドアの重さを感じることができる. このように空間性を利用した体験が実現できる. ただし, これまで述べてきたように, 全身による素早い動きにはまだ対応できない.

### 6.3 限界と改善点

本研究では, プロップの実装や, ソフトウェア, 臨場感研究など様々な要素に取り組んだ. 一方で, 以下のような様々な課題や議論が生まれた.

**アクチュエータロボット・トラッキングエリア:** 我々が利用したのは掃除ロボットであり, 自由度とスピードについてははもともと課題がある. ただし, 現状のスピードは安全性や心理的な障壁を小さくするためには, 決して悪くない選択肢である. 研究としては高価な全方位ロボットを導入し様々な設計を議論することも有意義であるが, おそらく近未来のルームスケール VR の環境はリビング, 教室, オフィスの一角などそれほど広くない環境だと予想する. 人が VR 内を歩く速度は, 1.26 m/s (in virtual reality [11])とされており, これに高速に追従しようとするとは異常なほど高速なロボットを稼働させなければならず, 室内空間では現実的ではない (実際に理想的なアクチュエータの速度を計算した結果, 最低でも 1 m/s の早さを持つロボットを準備しなければならない). したがって, ユーザの歩行速度を制限したままでもリアルな体験を生み出すことができるかどうかを検討することも極めて重要である. 一つの解決方法は, より高性能な制御アルゴリズムを開発してプロップの数を増やすことである. 本研究のケースでは, 3 つの壁プロップがあれば十分にユーザに追従できるが, 4 つ以上あればより多様な空間へ対応することができる. または, 本研究や関連研究[4,15]で利用したようなナレーションやストーリーを持たせて体験の一環として歩行速度を抑える方法である. 今回は暗闇のゲームにしたが, 細い道や歩く

際に床からの視覚フィードバックを含める方法など様々な可能性がある. 特にゲーム用途には有用であると考え. 最後に, 近年急速に研究が進んでいる **Redirected Walking**(e.g. [10,13])の技術を応用することで, ユーザはゆっくり歩いているのにもかかわらず, VR 空間では自然なスピードでの移動体験をさせるなど錯覚を用いることも有望である.

**経路探索:** 我々のシステムでは, 衝突回避をするための経路計画アルゴリズムを走らせていたが, 100%の接触回避はできなかった. シミュレータ上では実現できていたが, ルンバの回転と人が腕を伸ばすタイミングが重なると, 軽く接触することもあった. これは, ルンバが反転する際にグリップを失い, 少しずれて配置・移動してしまうことや, 単純にセンサエラーの蓄積など様々な課題から発生したものである. 壁プロップ自体に光学近接センサを設けるなど, 高精度な制御に向けた工夫は別途必要である.

**タッチ面予測アルゴリズム:** 今回の機械学習モデルは, 学習したシナリオとテストシナリオがほぼ同等であったために精度よく機能した. 本研究はケーススタディに近く, 予測モデルを一般化することはできない. しかし, ユーザがどの面に向かっているのかを 1 秒毎に予測し続ける予測モデルは, 他の典型的な基盤目構造の部屋に適用できるかもしれない. 例えば, 図 9 の例では, SVM とバウンディングボックスの Predictor を利用しており, 与えられた環境を 4 つの部分に区切り (図 9 中の左手廊下, 中央手前廊下, 右手廊下, 奥の小部屋), それぞれで予測アルゴリズムを働かせている. 結果は良好であり, 今後詳細な検証が必要だが, 基本的な環境で得た学習データであっても, 構造が類似していれば, 他の室内シナリオへも適用できる可能性は十分にあることが分かった.

**見えないロボット:** 実験を通して, ルンバの移動音はユーザの心理に悪影響を与えた. HMD を装着している状態ではその不安はさらに大きくなる. システムの制御の質が向上したとしても, 実験参加者が指摘したように, ユーザ

が状況を把握できるような仕組み, 例えば, 壁プロップの位置を半透明にユーザに提示することも有用だと考える. 慣れてきた場合に, 非表示にするかどうかをユーザが決められるような方法も有用かもしれない. 本研究は, 没入感や楽しさといった VR 体験を重要視したが, 常にそれが必要とは限らないという考え方もある. ロボットを使う研究である以上, その安全に関する懸念をどのように解消すべきか, さらに議論が必要である.

## 7. まとめ

複数の自走壁プロップを用いて, ルームスケール VR における空間インフラの触覚提示の方法を提案した. ユーザの行動からユーザがタッチするであろう VR の壁面を予測し, それに基づいて自走壁プロップを適宜配置して遭遇型触覚提示を実現する方法を模索した. 4m×3m の 4 つの壁に囲まれた部屋の環境において, ユーザのタッチ面予測アルゴリズムの性能をシミュレータにより検証し, 必要な壁プロップの数等の利用可能な条件を選定した. さらに, 実際にモバイルロボットを用いてプロトタイプを実装し, ゲームを使ったユーザスタディを実施した. その結果, 提案システムにより, ユーザのルームスケール VR 体験の質が有意に向上したことを示した. 今後はモバイルロボットの制約を様々な錯覚手法で解決することなどが挙げられる.

## 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 (17K00262, 19KK0258) の補助を受けた.

## 参考文献

1. Muhammad Abdullah, Minji Kim, Waseem Hassan, Yoshihiro Kuroda, and Seokhee Jeon. Hapticdrone: an encountered-type kinesthetic haptic interface with controllable force feedback: Initial example for 1D haptic feedback. *Adjunct UIST*, 115–117, 2017.
2. Mahdi Azmandian, Mark Hancock, Hrvoje Benko, Eyal Ofek, and Andrew D Wilson. Haptic retargeting: dynamic repurposing of passive haptics for enhanced virtual reality experiences. *CHI*, 1968–1979, 2016.
3. Lung-Pan Cheng, Eyal Ofek, Christian Holz, Hrvoje Benko, and Andrew D Wilson. Sparse hapticproxy: touch feedback in virtual environments using a general passive prop. *CHI*, 3718–3728, 2017.
4. Lung-Pan Cheng, Thijs Roumen, Hannes Rantzsch, Sven Köhler, Patrick Schmidt, Robert Kovacs, Johannes Jasper, Jonas Kemper, and Patrick Baudisch. Turkdeck: physical virtual reality based on people. *UIST*, 417–426, 2015.
5. Ryokichi Hirata, Hiroshi Hoshino, Taro Maeda, Susumu Tachi. A force and shape display for virtual reality system. *Transactions of the Virtual Reality Society of Japan*, 1, 1, 23–32, 1996 (in Japanese).
6. Brent Edward Insko, M Meehan, M Whitton, and F Brooks. Passive haptics significantly enhances virtual environments. *Ph.D. Dissertation. University of North Carolina at Chapel Hill*, 2001.
7. Caroline Jay and Roger Hubbard. Delayed visualand haptic feedback in a reciprocal tapping task. *World Haptics*, 655–656, 2005.
8. Yaesol Kim, Hyun Jung Kim, and Young J Kim. Encountered-type haptic display for large VR environment using per-plane reachability maps. *Computer Animation and Virtual Worlds*, 29, 3–4, 2018
9. Néstor Andrés Arteaga Martín, Victor Mittelstädt, Michael Prieur, Rainer Stark, and Thomas Bär. Passive haptic feedback for manual assembly simulation. *CIRP* 7, 509–514, 2013.
10. Keigo Matsumoto, Yuki Ban, Takuji Narumi, Yohei Yanase, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Unlimited corridor: redirected walking techniques using visuo haptic interaction. *SIGGRAPH 2016 E-tech*.
11. Betty J Mohler, William B Thompson, Sarah HCreem-Regehr, Herbert L Pick, and William H Warren. Visual flow influences gait transition speed and preferred walking speed. *Experimental Brain Research*, 181, 2, 221–228, 2007.
12. Adalberto L. Simeone, Eduardo Velloso, and Hans Gellersen. Substitutional reality: using the physical environment to design virtual reality experiences. *CHI*, 3307–3316, 2015
13. Qi Sun, Anjul Patney, Li-Yi Wei, Omer Shapira, Jingwan Lu, Paul Asente, Suwen Zhu, Morgan Mcguire, David Luebke, and Arie Kaufman. Towards virtual reality infinite walking: dynamic saccadic redirection. *ACM TOS*, 37, 4, 67, 2018.
14. Kazuki Takashima, Takafumi Oyama, Yusuke Asari, Ehud Sharlin, Saul Greenberg, and Yoshifumi Kitamura. Study and design of a shape-shifting wall display. *DIS*, 796–806, 2016.
15. Shan-Yuan Teng, Cheng-Lung Lin, Chi-huan Chiang, Tzu-Sheng Kuo, Liwei Chan, Da-Yuan Huang, and Bing-Yu Chen. TilePoP: Tile-type pop-up prop for virtual reality. *UIST*, 639–649, 2019.
16. Jur Van den Berg, Ming Lin, and Dinesh Manocha. Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation. *IEEE Robotics and Automation*. 1928–1935, 2008.
17. The Void. 2019. <https://www.thevoid.com>.
18. Emanuel Vonach, Clemens Gatterer, and Hannes Kaufmann. VRRobot: robot actuated props in an infinite virtual environment. *IEEE VR*, 74–83, 2017.
19. Bob G Witmer and Michael J Singer. 1998. Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence* 7, 3, 225–240, 1998.
20. 福島 寛之, 矢野 博明, 野間 春生, 岩田 洋夫, 全方位移動ロボットを用いた歩行感覚呈示装置 CircularFloor, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 11 巻, 2 号, p. 237–244, 2006.