



# 力覚を提示する VR ボルダリングシステムの開発

戸田貴仁, 臼井裕貴, 満田隆

立命館大学 情報理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1 丁目 1-1)

**概要:** 突起を掴んで登る力覚が得られる VR ボルダリングシステムを開発した。実際の手の動きより VR 空間上の手の動きを遅く表示して力覚を提示する手法と、手首を空気圧カフで圧迫して力覚を提示する手法を比較した結果、重量感覚、突起を掴んだ・力を加えた感覚、登攀感覚のいずれも、2つの手法を同時に用いた場合が、それぞれの手法を単独で用いたときよりも高く評価された。

**キーワード:** 力覚 体性感覚 ボルダリング

## 1. はじめに

HMD のように視覚刺激を利用する VR においては、仮想空間内の物体の形状や重さなど、視覚や聴覚以外の五感の感覚が得られるものは少なく、現実での五感による感覚と、VR の仮想空間内の視覚的な感覚との情報の違いから、没入感が阻害されてしまうことがある。VR ゲームとして多く提供されているものに VR クライミング・ボルダリングゲームがあるが、市販品は、視覚、聴覚のみに作用し、登る感覚を提供するものである。しかし、ボルダリングでは突起を掴み、自身の体を持ち上げる必要があるため、壁や崖を登っているという感覚は現実のものとは異なり、力触覚的な観点からは十分な疑似体験を提供できていない。

そこで本研究では、手首の圧迫により重さを疑似生起させる手法[1]と、VR 空間内の物体の動きを現実より遅らせることで重さを生起させる手法[2]を用いて力覚によって疑似体験を提供する VR ボルダリングシステムを開発した。HMD を利用する環境は、自室やイベントスペースなどの狭い空間であると想定される。そこで、広い空間を使用する装置を必要とせず、重量感覚を提示できるこれら 2 つの手法を利用した。

## 2. VR ボルダリングシステム

### 2.1 手首圧迫による力覚提示

操作者の手の動作に合わせて手首を圧迫することで疑似的に力覚が得られる[1]。先行研究では、血圧計のカフを手首に装着しカフの内圧によって圧迫力を強めると、重量感も増加することが示されている。

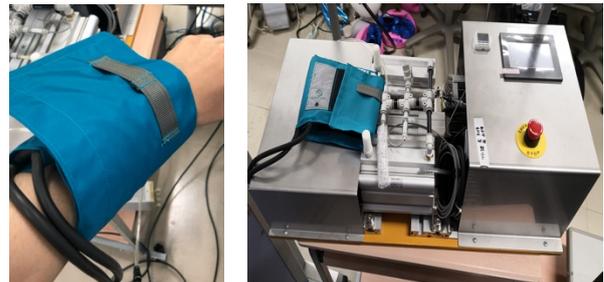


図 1 カフ装着時の様子(左)と空気圧制御装置(右)

そこで本研究では、先行研究と同様に血圧測定用のカフを手首に装着し、壁の突起を掴んで身体を持ち上げる際に手首を圧迫して力覚を提示することを試みた。カフの空気圧は、カフにエアチューブで接続したエアシリンダを電動シリンダで動作させて高速に調節できるようにした。操作者がカフを装着した様子と、カフの空気圧制御装置を図 1 に示す。

### 2.2 VR 空間での動作遅延による力覚提示

五感の相互作用により、そこにはないはずの刺激を感じてしまう人間の知覚特性を利用し、現実での手の動作と VR 空間での手の動きを視覚的にずらして表示させることで、重量感を疑似生起させることができる。本稿では、以下、この手法を遅延手法と呼ぶ。本研究では、先行研究[2]を参考に以下の式でプレイヤーの手の表示位置を調節した。

$$Y_f = Y_{f-1} + (y_f - Y_{f-1})k \quad (1)$$

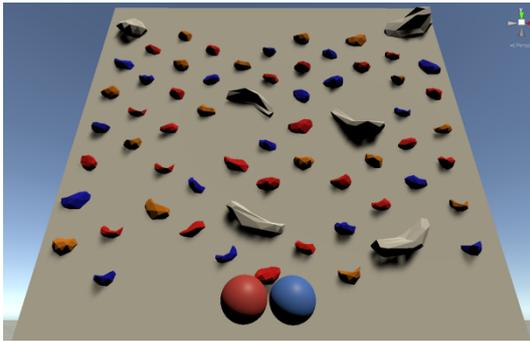


図2 Unityで作成したボルダリングウォールと手の位置を示す球体

ここで、 $y$  は現実空間でのプレイヤーの手の位置、 $Y$  は VR 空間での手の位置、 $f$  はフレーム番号、 $k$  は遅延を調節するゲイン(0~1)である。 $k$  が 1 であるときは、遅延がまったくなく、実際の手の動きに同期して、VR 空間に表示される手も動く。 $k$  が小さくなるにつれて、VR 空間の手は、実際の手の動きに遅れて表示される。本研究では使用した HMD の仕様により、画面表示のリフレッシュレートを 90 Hz とした。

### 2.3 ボルダリングシステム

VR 空間でのボルダリングシステムはゲーム開発エンジンである Unity (Unity Technologies, 2019 2.14f) と VivePro (HTC)を用いて作成した。プレイヤーは HMD を頭部に装着し、両手にコントローラを持つ。VR 空間に作成したボルダリングウォールと手の位置を示す球体を図 2 に示す。ボルダリングウォールは 3DCG 制作ソフト Blender2.8(Blender Foundation)で制作し、縦横の幅は 6 m、突起は中心間距離の最小値が 0.6 m となるように配置した。プレイヤーの手は直径 0.15 m の球体で表示した。ボルダリングウォールにある突起と手の球体が重なった時に、コントローラ背部にあるトリガーを押すことで、突起が把持されたと判定し、コントローラに壁と地面が追従する。このとき、プレイヤーの位置は変化せず、プレイヤーが壁を登っているような視点となる。追従する速度は式(1)のパラメータ  $k$  によって変化させた。

## 3. 遅延手法の遅延パラメータ評価実験

### 3.1 目的

開発したボルダリングシステムにおいて、最も力覚や登った感覚が得られる遅延手法の遅延パラメータ  $k$  を調べるために実験を行った。

### 3.2 方法

6人の被験者(20代男性4名女性1名、50代女性1名)に対して実験を行った。実験には前節で示したシステムを用い、手首圧迫は用いず遅延手法のみで力覚を提示した。遅延手法に用いるパラメータ  $k$  は 1, 0.5, 0.1, 0.02, 0.01, 0.005 の 6 種類を用意し、各パラメータでボルダリングウォールを登ってもらった。初めは  $k$  を 1 として、遅延がない状態で登ってもらい、つぎに  $k$  を順に小さくして遅

表1 力覚と登攀感覚が最も得られた遅延パラメータ(○)と2番目に得られた遅延パラメータ(△)

	k=1	k=0.5	k=0.1	k=0.02	k=0.01	k=0.005
被験者1				△	○	
被験者2				△	○	
被験者3					○	△
被験者4					○	△
被験者5					○	△
被験者6				△	○	

延を大きくして登ってもらい、現在の条件と 1 つ前の条件のどちらがより重さを感じたか、もしくは登っている感覚を得ることができたかを質問した。各パラメータの体験時間は指定せず、被験者が回答した時点でそのパラメータを終了した。各パラメータの体験は 1 度のみで最後に、1 番目と 2 番目に重く登攀感覚を感じたパラメータを答えてもらった。また、最後に自由に感想を回答してもらった。

### 3.3 結果

各被験者が最も重い、登っている感覚があったと回答したパラメータを表 1 に示す。○が最も重い、登攀感覚があったと回答したもので、△が 2 番目に感じたものを示している。先行研究[2]では、パラメータ  $k$  が小さくなるほど重さ感覚が得られていたが、今回の実験ではパラメータ  $k$  が 0.01 のときに最も重さ感覚、登攀感覚が得られたと 6 人全員が回答した。パラメータ  $k$  が 0.005 では VR 空間内の手の動きが遅すぎるため、重さ感覚はあるが、それ以上に違和感があり、0.01 の方が重さ感覚や登攀感覚を得られることができたとして 5 人が回答した。実験時間は指定していなかったが、全ての被験者は各パラメータ 1 分以内で回答した。

### 3.4 考察

先行研究[2]ではダンベルを下から上に持ち上げる動作での重量感を計測していたが、本実験では横方向や上から下に手を移動させる動作で、さらに、重さ感覚とは別に登攀感覚についても評価を行った。そのため、移動速度の極端な遅さが登攀感覚に対しての違和感を生み、結果が先行研究と異なると考えられる。

## 4. 遅延手法と手首圧迫手法を組み合わせたときの評価実験

### 4.1 方法

遅延手法と手首圧迫手法を組み合わせて用いた場合の力覚と登攀感覚を調べる実験を行った。被験者は男性 12 人(21-24 歳)で、2 章のシステムを用いて実験を行なった。

手首圧迫手法では、圧迫タイミングや圧迫速度によって得られる感覚にどのような違いがあるかを調べるため、コントローラのトリガーを押して壁の突起を掴んだ直後に約 0.2 秒で急速に圧迫する急速圧迫条件と、壁の突起を掴んだ後、腕を動かした瞬間から約 1 秒かけて

表 2 重量感提示手法の組み合わせ

	遅延手法	手首圧迫手法	
		急速	緩慢
条件1	○	×	×
条件2	×	○	×
条件3	×	×	○
条件4	○	○	×
条件5	○	×	○

徐々に圧迫する緩慢圧迫条件の2つを用意した。

本来、突起を掴んだ時点では腕に力を感じず、突起を引っ張り始めたタイミングで腕に力を感じるはずであると考えられる。そのため、緩慢圧迫条件では、突起を掴んだから手を1.5 cm 動かしたタイミングで圧迫を開始した。手を動かし始めた直後ではなく、1.5 cm 動いたあとで圧迫を始めたのは、Vive コントローラのトラッキング誤差が0.5 cm 程度あり、誤差による誤動作を防ぐためである。また、VR ボルダリング体験の前に、手首圧迫で痛みを感じる圧力を被験者毎に調べて、痛みが生じる圧力の8割となるよう調整を行った。

遅延手法では3章に示した実験で、最も重さ感覚と登攀感覚が生じた遅延パラメータ( $k=0.01$ )を用いた。

視覚による遅延手法と触覚による手首圧迫手法では、提示させる感覚が異なるため、互いに影響し合う可能性がある。そのため、遅延手法と、2種類の手首圧迫手法(急速圧迫と緩慢圧迫)を単独で用いた場合と、それらを組み合わせた場合の計5条件での実験を行った。提示条件の組み合わせを表2に示す。

まず、被験者には遅延手法や手首圧迫で重量感を提示していない基本状態を体験させた。その後、各条件で重量感を提示したものを体験させ、評価アンケートに答えてもらった。実験時間は指定せず、被験者が評価値を定めた時点で実験を終了した。アンケートでは、腕にどの程度重さを感じたか、壁を掴んだ感覚・指に力を加えた感覚はどの程度あったか、壁を登った感覚はどの程度あったかの3つの質問に、重量感提示を行っていない標準刺激を評価値1とした7段階評価(1~7)で答えてもらった。また、実験終了後、自由アンケートの回答も行ってもらった。各条件の提示順序を6種類用意し、被験者間でカウンターバランスをとって順序効果が生じないようにした。

#### 4.2 結果と考察

12人のうち、10人(被験者 a~e, h~l)は遅延条件と手首圧迫条件をそれぞれ単体で提示した体験より、2つを組み合わせた体験での評価を高く答えた。しかし、被験者 f は単体での提示を高く評価し、組み合わせた条件では、遅延手法と手首圧迫手法のそれぞれで得られる感覚が邪魔しい、集中できなくなったと回答した。被験者 g は提示条件ごとの評価の差がほとんどなく、各条件での違いがあまりわからなかったと回答した。そこで、同じ傾向が見られた

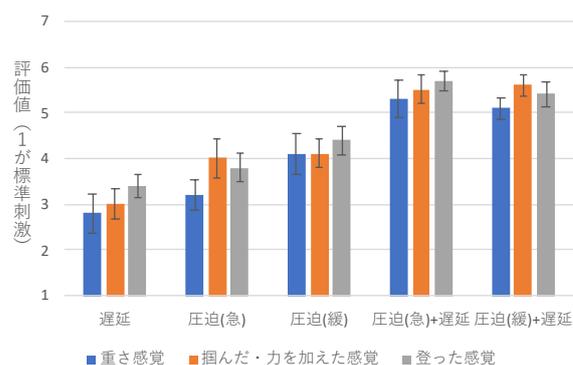


図 3 力覚提示手法毎の感覚評価(同じ傾向を示した被験者 10 人の平均。エラーバーは標準誤差を示す。)

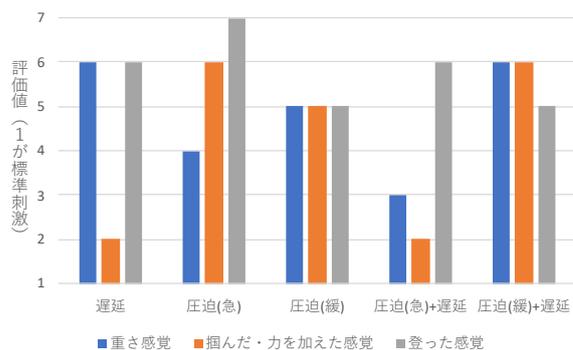


図 4 力覚提示手法毎の感覚評価 (被験者 f)

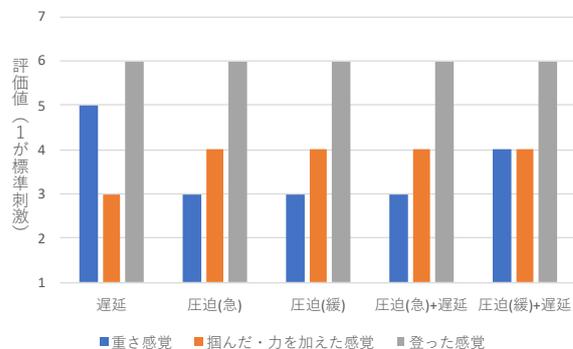


図 5 力覚提示手法毎の感覚評価 (被験者 g)

10人のデータを平均した結果を図3に示す。また、被験者 f と被験者 g の結果を図4、5にそれぞれ示す。

同じ傾向を示した10人では、重さ感覚、掴んだ・力を加えた感覚、登った感覚のいずれの感覚も、遅延手法と手首圧迫手法を同時に用いたほうが、それぞれを単体で用いたときよりも有意に高かった( $p<.001$ )。また、全被験者12人を用いた解析でも、単体手法と組み合わせ手法の間に有意差が見られた( $p<.01$ )。

つぎに、手首圧迫手法を単独で用いた場合、3つの感覚の平均値は、急速圧迫条件( $M=3.7$ )よりも、緩慢圧迫条件( $M=4.2$ )のほうが高かった。また、緩慢圧迫を高く評価した人数のほうが多く(7人)、急速圧迫条件を高く評価した被験者は2人、同じ評価としたのが1人であった。この結果

は、前述した通り、壁を掴んだ瞬間に重さを感じるのではなく、壁を掴み、引き下げた時に重さを感じるという予想通りになったと解釈できる。

しかし、遅延手法と手首圧迫条件を組み合わせた場合には、緩慢圧迫(M=5.5)と急速圧迫(M=5.4)の差は小さく、重さ感覚と登った感覚については、急速圧迫条件のほうが高く評価された。また、遅延手法と急速圧迫の組み合わせを高く評価した被験者は6人、遅延手法と緩慢圧迫の組み合わせを高く評価したのは3人、同じ評価としたのが1人で、単体で提示した場合とは逆の結果となった。この結果は、遅延手法と緩慢圧迫で生じられる感覚が類似しているためではないかと考える。遅延手法と急速圧迫手法を組み合わせた時には、それぞれで得られる感覚が異なっていたため、お互いの感覚が邪魔し合わず評価が大きく上昇したと考えられる。また、遅延手法と緩慢圧迫手法の組み合わせでは感覚が類似していることから、評価値の大きな上昇が見られなかったと考えられる。

これらの結果から、急速な圧迫と遅延手法を組み合わせて提示する手法がボルダリングに適していると考えられる。

## 5. まとめ

本研究の目的は、VR空間上で視覚的に物体を遅れさせて表示することで力覚を提示する手法と、手首を圧迫することで力覚を提示する手法を用いて、壁を登った感覚を生じさせることであった。実験結果から、どの手法を用いても力覚を提示していないボルダリング体験よりも、登った感覚が強くと得られ、二つの手法を同時に用いることでさらに強い登攀感覚が得られることが示された。また、手首圧迫のタイミングや圧迫速度によって得られる感覚が異なる可能性も示された。本研究では、手首圧迫の手法を2種類のみ用意し比較した。さらに、効果的に力覚を提示させるために、圧迫タイミングと圧迫速度の最適化の検討が今後の課題である。

## 参考文献

- [1] 満田(2007), 手首圧迫による擬似力覚の提示. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 12(4), 577-583. doi: 10.18974/tvrsj.12.4\_577
- [2] 平尾, 三家, 河合(2018). VR空間におけるクロスモーターを用いた重さ感覚提示手法の提案と評価. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 23(4), 263-270, doi: 10.18974/tvrsj.23.4\_263