

Boomshin: 触覚提示の有無を時間的に変動させる VR ゲーム体験の評価

奥谷 哲郎^{1,a)} 田井 普¹ 中西 泰人¹

概要: 遭遇型触覚ディスプレイを用いて、VR 空間内の物体の触覚提示の有無を時間的に切り替えることが、VR ゲーム体験に及ぼす影響を調査した。触覚提示がある物体・ない物体をそれぞれ実体・分身と名付け、両者の時間的な出現パターンを独立変数とし、VR ゲーム体験の印象の変化を評価した。その結果、実体あるいは分身のみの場合よりも、両者が混在している場合のほうが、ゲームにおける驚きおよび満足感が高くなることが明らかになった。また、体験中に実体の出現頻度を急激に変化させることで、より大きな印象変化を提示可能であることが明らかになった。

1. はじめに

バーチャル・リアリティ (VR) 体験における触覚フィードバックは、臨場感や没入感を高めるための重要な要素である。そのため、これまでに VR 空間における様々な触覚提示手法が提案されており、その 1 つに移動ロボットを用いた遭遇型触覚ディスプレイがある。この手法は、実際の接触現象を用いているため、自然な触覚を提示することに優れている反面 [1]、ディスプレイの移動速度や移動範囲の制約から、時間的に完全な触覚提示を行うことは難しい。

一方、ゲームデザインや行動分析学の分野では、継続的に与えられる対価 (連続強化) よりも、断続的に与えられる対価 (部分強化) のほうが行動に与える影響が大きく、強く関心を引くことが示唆されている [2][3][4]。

以上の事柄から、遭遇型触覚ディスプレイを用いて、VR 空間において触覚提示がある物体とない物体を混在させることで、触覚の断続的対価が生じ、VR ゲーム体験の印象を変容させることができるのではないかと考えた。

そこで、本研究では、視覚的には提示されているが触覚提示がない物体を、アニメや漫画の表現に沿って分身、触覚提示がある物体をそれに対して実体と名付けた。そして、差動二輪型の移動ロボットを用いて遭遇型触覚ディスプレイを構築し、どのように実体と分身の触覚的差異を提示すれば、体験者の印象を大きく変化させることができるかについて、実体および分身の時間的な出現パターンを独立変数として調査を行った。

2. 関連研究

2.1 移動ロボットを用いた遭遇型触覚ディスプレイ

遭遇型触覚ディスプレイとは、ユーザと環境との間に接触が生じた瞬間に、その位置に障害物を配置する触覚ディスプレイの方式であり、これまでに移動ロボットを用いた様々な手法が提案されている [5][6][7]。本研究では、触覚の有無による違いを明確に提示するために、より自然で大きい反力を提示可能な遭遇型触覚ディスプレイを採用した。

一方で、移動ロボットを用いた遭遇型ディスプレイには、移動速度や提示範囲が限定されるという問題点が存在するため、すべての物体に対して完全な触覚提示が可能なのではない。本研究では、触覚が生じない物体でも VR 体験の質の変化に貢献する手法を検証することで、これらの制約を補償することを考えた。

2.2 断続的対価による行動変化

オペラント条件付けは、行動に後続する環境変化によってその後の行動の出現頻度が変容する学習である [8]。オペラント条件付けの手続きに関して、全ての行動に対して強化子を与える連続強化よりも、一部の行動に対してのみ強化子を与える部分強化のほうが、その後の行動の生起頻度が高く維持されることが知られている [3]。断続的な対価 (部分強化) を RPG ゲームの報酬として組み込むことで、ゲームにおけるやる気を高める手法が提案されている [4]。スロットマシンの面白さや中毒性を構成する要素として、不定期に断続的な対価を与えるオペラント条件付けの定比率強化スケジュールに基づいた設計が挙げられる [9]。

¹ 慶應義塾大学環境情報学部

^{a)} t19172to@sfc.keio.ac.jp



図 1 遭遇型触覚ディスプレイ

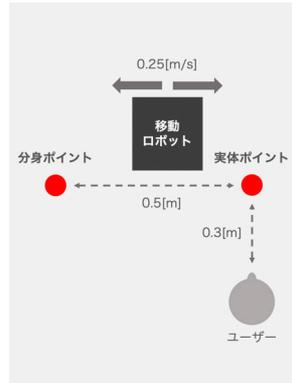


図 2 ロボットの移動経路

本研究では、VR 空間における触覚提示を対価として捉え、それを触覚提示がない物体と組み合わせて断続的な対価として提示することで、体験者の行動に影響を与えることが可能であると考えた。

3. システム設計

3.1 遭遇型触覚ディスプレイ

差動二輪型の移動ロボットを用いて遭遇型の触覚ディスプレイを構築した。同ディスプレイは、駆動部と触覚を提示する接触部によって構成されており、全体の大きさは $300 \times 300 \times 700$ [mm] である。駆動部には Turtlebot3 waffle pi, その制御には Raspberry pi 4 および ROS2 (Robot Operation System 2) を用いた。接触部は Turtlebot3 の上部に固定した段ボール箱で構成した (図 1)。

3.2 VR 分身ゲーム: Boomshin

この遭遇型触覚ディスプレイを用いて、前方から接近してくるターゲットを次々にハンマで叩くゲームである「Boomshin」を制作した。VR 空間の構築には Unity 2020.3.17f1 を使用した。また、VR 空間の提示には HMD (Oculus Quest 2) を用いた。

ターゲットは 3 秒間隔で生成され、 0.15 [m/s] でユーザーの方向に直進する。ターゲットの寸法は触覚ディスプレイのものに合わせた。次のターゲットが実体ならばユーザーの前方 30 [cm] の実体ポイント、分身ならばそこから左に 50 [cm] ずれた分身ポイントに、触覚ディスプレイを事前に移動させる (図 2)。ユーザーは前方のスポットライト照射部分にターゲットが侵入したタイミングでハンマを振り下ろす。その際、それが実体ならば目の前の触覚ディスプレイをハンマで叩くことで触覚が生じ、分身ならば実機は横にずれた位置にいるため触覚は生じない (図 3)。おもちゃのハンマに Oculus Quest 2 のコントローラを固定することで、VR 空間のハンマと物理空間のハンマの姿勢を一致させている (図 4)。叩いた瞬間には視覚エフェクトと効果音を発生させた。ロボットのモータ音を遮断するために、体験中は常にイヤホンを通じて BGM を再生した。

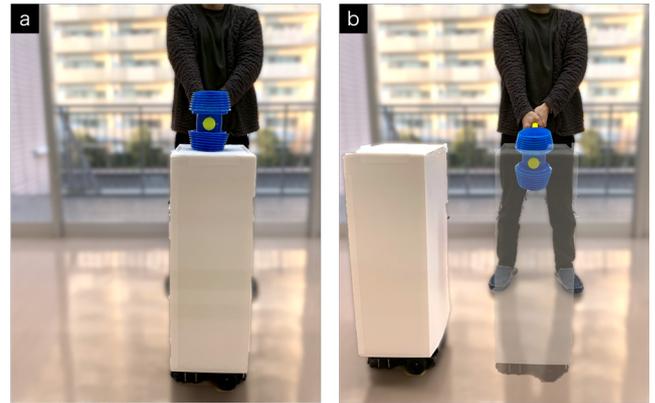


図 3 触覚提示の有無を切り替えるシステムが動作する様子 a) 実体を叩く様子, b) 分身を叩く様子

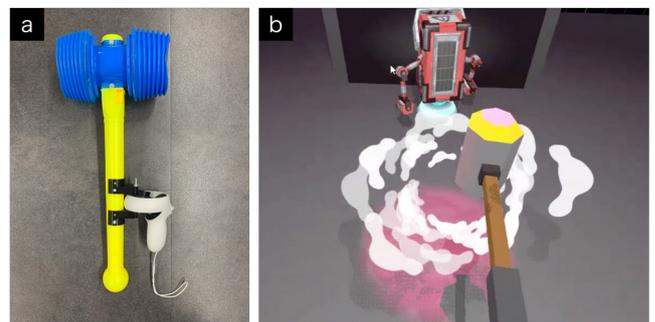


図 4 a) ハンマの外観, b) HMD 装着者の視点

4. 実験

実体と分身の様々な時間的な提示パターンが VR 体験の印象に与える影響を調査するために、2 つの実験を実施した。実験 1 と実験 2 は連続して実施し、間に 3 分間の休憩を設けた。実験参加者は男性 6 名、女性 1 名だった (年齢 $M = 28.3$, $SD = 11.5$)。また、実験参加者に対して事前に VR ゲーム経験の量を問うアンケートを実施した。全試行の終了後、半構造化インタビューを行なった。

4.1 実験 1: Single Phase

4.1.1 実験目的

実体と分身の生起頻度を様々に変化させたとき、VR 体験の印象にどのような変化が生じるかを調査した。ただし、それらは体験中は一定であるという条件 (Single Phase) を課した。実体と分身を混在させることで、ゲームにおける驚き、緊張感、満足感が向上する、さらにその際実体の数が多いほど効果が大きくなるという仮説のもとで、実験を実施した。

4.1.2 実験条件

ターゲットの総出現数は、1 試行につき 9 体とした。そのうち、実体が占める割合を“実体率”として設定し、実験における独立変数として用いた。例えば、実体率が 0.3 の場合、9 体中 3 体は実体、残りの 6 体は分身となる。ター

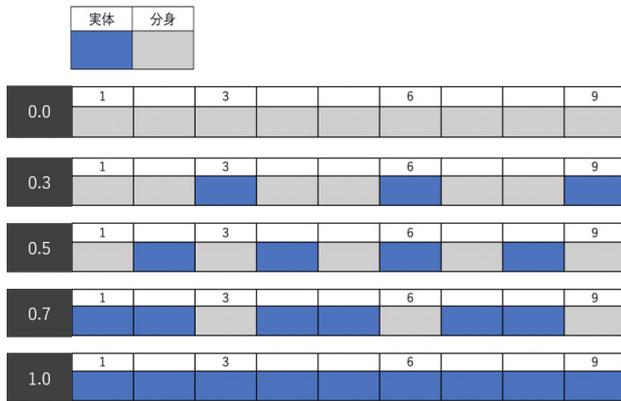


図 5 実験 1 における各実体率ごとの実体と分身が出現する順番

ゲットが全て分身の場合の 0.0 と、全て実体の場合の 1.0 に加えて、0.3、0.5、0.7 の計 5 つの水準を設けた。実験は各水準につき 1 試行ずつ、被験者内実験計画で行なった。

実体と分身が出現する順番は、実体率の値から実体および分身の総数を計算し、そのうちの総数が少ないほうを等間隔で配置することによって決定した (図 5)。実験参加者のうち 3 名には、5 つの実体率を 0.0 から上昇系列で、4 名には 1.0 から下降系列で提示した。各試行のターゲットの総数と実体率は実験参加者には知らせず、条件が提示される順番もランダムであるという虚偽の説明を行なった。

4.1.3 実験手順

- (1) HMD を装着し、ハンマを把持させる。また、ロボットの移動によって生じる音と振動を遮断するために、イヤホンおよびサンダルを着用させる。
- (2) 練習として、計 9 体の実体と分身を交互に叩かせる。その際、ハンマは持ち手部分を両手で握ることと、振りかぶる範囲、その場に立ったまま移動しないようにすることを指示する。
- (3) 実験プログラムを実行する。
- (4) 試行の終了後、コントローラを使って、以下の質問に対して 7 段階のリッカート尺度で回答させる。
 - Q1. 全体的にどれくらい驚きを感じましたか？
 - Q2. 全体的にどれくらい緊張しましたか？
 - Q3. 全体的にどれくらい満足感を感じましたか？
- (5) 次の実体率について、(3)(4)を行なう。

4.1.4 実験結果と考察

各質問に対する回答値の結果を図 6 に示す。

有意水準 5% で Kruskal-Wallis 検定を行なった結果、実体率に対して Q1 と Q3 の有意な主効果が示された (それぞれ $H = 11.762$, $p = 0.019$; $H = 12.137$, $p = 0.016$)。Q2 においては有意差が見られなかった ($H = 5.352$, $p = 0.253$)。

Q1 と Q3 について、Bonferroni 補正を適用した Mann-Whitney の U 検定を有意水準 5% で行なった結果、Q1 では実体率 0.3 と実体率 1.0 の代表値の間 ($U = 47.5$, $p =$

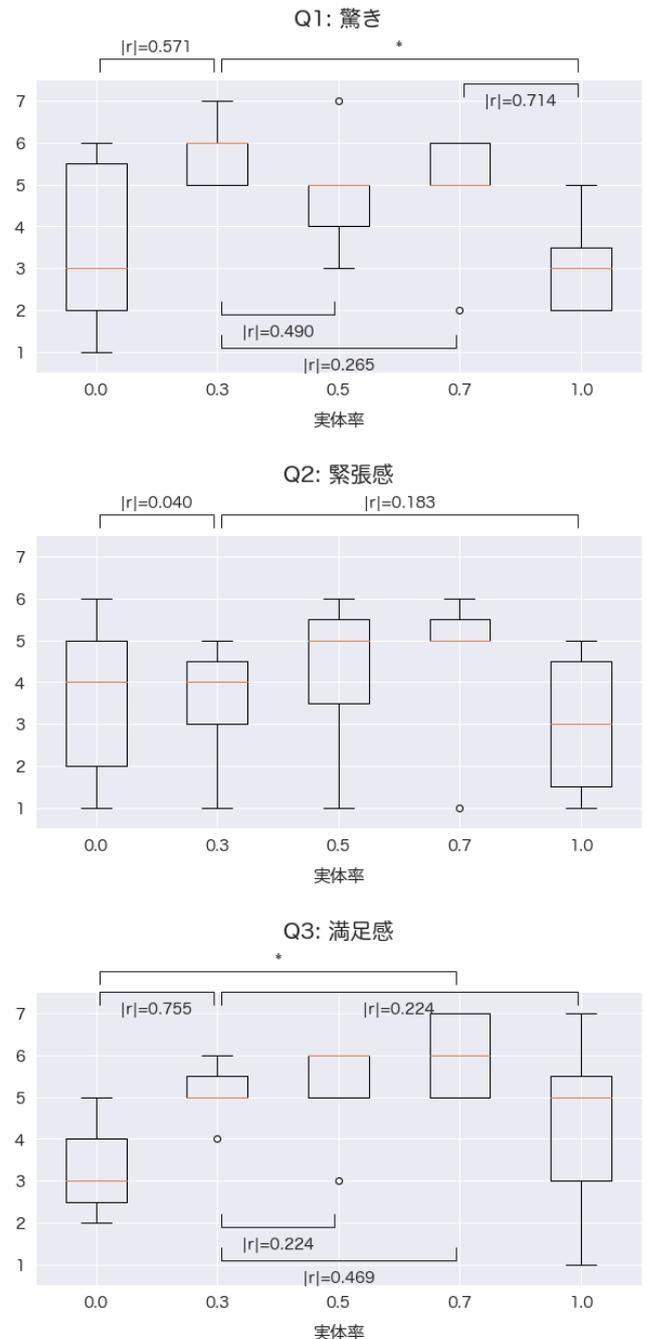


図 6 実験 1 の結果

0.033, $r = -0.939$), Q3 では実体率 0.0 と実体率 0.7 の代表値の間 ($U = 30$, $p = 0.039$, $r = 0.878$) に有意差が確認された。

また、Q1 と Q3 における各水準間の効果量を計算した結果、実体率 0.0 と実体率 0.3 の間で効果量が大きかった (それぞれ $r = 0.571$; $r = 0.755$) ことから、実体と分身を混合して断続的な触覚提示を行うことで、VR ゲーム体験における驚きと満足感が向上することが示唆された。しかし、Q3 における実体率 0.3 と実体率 1.0 の間の効果量は比較的小さく ($r = 0.224$)、すべて実体の場合でも高い満足感を感じた実験参加者も存在した。加えて、Q1 における

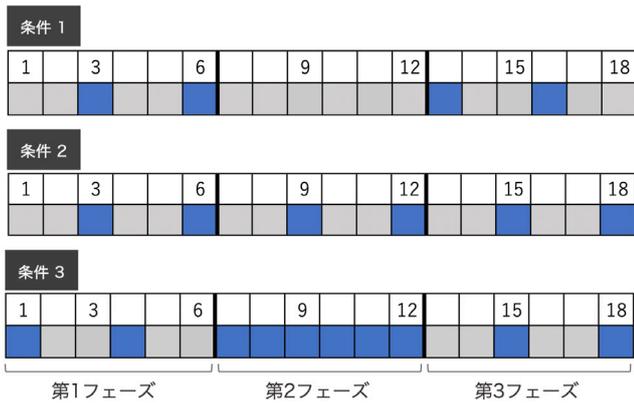


図 7 実験 2 における各条件ごとの実体と分身が出現する順番

実体率 0.3 と実体率 0.5 の間の効果量が比較的大きかった ($r = 0.490$)。一方、Q1 における実体率 0.3 と実体率 0.7 の間の効果量は比較的小さかった ($r = 0.265$)。

4.2 実験 2: Multiple Phase

4.2.1 実験目的

実体と分身の生起頻度が時間によって変化する (Multiple Phase) 場合について、VR 体験の印象がどのように変化するかを調査した。体験中に実体率を変化させることで、それが常に一定の場合よりも、ゲームにおける驚き、緊張感、満足感が向上するという仮説のもとで、実験を実施した。

4.2.2 実験条件

ターゲットの総出現数は、1 試行につき 18 体とした。それを 6 体ずつ第 1 フェーズ、第 2 フェーズ、第 3 フェーズの計 3 フェーズに分割し、各フェーズに独立に実体率を割り当てた。具体的には、条件 1: [0.3 → 0.0 → 0.3]、条件 2: [0.3 → 0.3 → 0.3]、コントロール条件として条件 3: [0.3 → 1.0 → 0.3] の 3 水準を設けた。実験は各水準につき 1 試行ずつ、被験者内実験計画で行なった。実体と分身が出現する順番は、各フェーズの順番を実験 1 と同様に等間隔で決定し、それらを順番に並べた (図 7)。各試行の総数と条件は実験参加者には知らせず、条件が提示される順番もランダムであるという虚偽の説明を行なった。

4.2.3 実験手順

実験手順は練習を実施しない点を除き、実験 1 と同様である。条件は、条件 1、条件 2、条件 3 の順番で提示した。

4.2.4 実験結果と考察

各質問に対する回答値の結果を図 8 に示す。なお、ロボットの動作音、振動に明らかに気づいたと回答した 2 名の実験参加者のデータは除外している。

有意水準 5% で Kruskal-Wallis 検定を行なった結果、実体率に対して Q1、Q2、Q3 の有意な主効果は確認されなかった (それぞれ $H = 2.592$, $p = 0.274$; $H = 3.068$, $p = 0.215$; $H = 2.915$, $p = 0.232$)。Bonferroni 補正を適用した Mann-Whitney の U 検定を有意水準 5% で行なった

結果、Q1 の条件 3、Q2 の条件 1、Q3 の条件 1 および条件 2 の回答値は、4 よりも有意に大きいことが示された (それぞれ $U = 25.0$, $p = 0.016$; $U = 25.0$, $p = 0.019$; $U = 25.0$, $p = 0.021$; $U = 25.0$, $p = 0.020$)。また、Q1 の条件 1、Q2 の条件 3 の回答値は、3 よりもそれぞれ有意に大きいことが示された (それぞれ $U = 25.0$, $p = 0.016$; $U = 25.0$, $p = 0.020$)。

すべての質問において、条件 1 と条件 3 の間の効果量は小さかった (それぞれ $r = -0.199$; $r = 0.079$; $r = 0.160$)。一方で、各質問における条件 1 と条件 2、条件 3 と条件 2 の間の効果量は大きい値を示し、実体率が常に一定の条件 2 の回答値は他条件に比べて全体的に低い傾向が見られた。したがって、実体率を時間的に変動させることで、一定以上の驚き、緊張感、満足感を提示できることが示唆された。

5. 考察と今後の課題

5.1 考察

5.1.1 実験 1: Single Phase

実験 1 において、驚きと満足感に関しては、実体と分身の混在条件とどちらか一方のみの条件の間に有意な差が確認された一方で、緊張感に関しては両者の有意差が見られず、仮説は部分的に支持された。

これについて、「実体率 0.0 や実体率 1.0 では、どのタイミングで分身・実体が出現するのかを常に考えていたから逆に緊張した」という感想が 4 名の実験参加者から得られたことから、実体と分身が毎回必ず両方とも出現するという先入観と、条件を提示する順番による順序効果が、緊張感の評定に影響を及ぼしたと考えられる。驚きに関して、実体率 0.0 の回答値の分散が大きいことも、それと同様の理由によるものと推測される。

また、実体率 0.3 と実体率 1.0 の間で、満足感に大きな差異は見られなかった。その理由として、VR ゲーム経験の量の違いが考えられる。事前アンケートで VR ゲームをプレイしたことがない、あるいはその回数が少ないと回答した実験参加者は、実験後のインタビューで「VR 空間内の物体を叩ける (触覚が得られる) こと自体が楽しかった」と述べる場合が多く、ゲーム中の物体を全力で叩くこと自体に満足感を見出していたことが推測される。

実体率 0.3 と実体率 0.5 の間では、驚きの回答値に大きな差が確認され、後者のほうが驚きが小さい傾向が見られた。この原因として、実体率 0.5 は実体と分身が交互に出現するため、次のターゲットが実体か分身かどうかを比較的容易に予測可能であったことが考えられたが、7 名中 6 名の実験参加者はその規則性に気づかなかったと回答した。したがって、これは実体と分身の生起頻度の違いによるものであり、特に実体率 0.3 や 0.7 のように両者の生起頻度がアンバランスな場合に大きな驚きが生じることが示唆された。

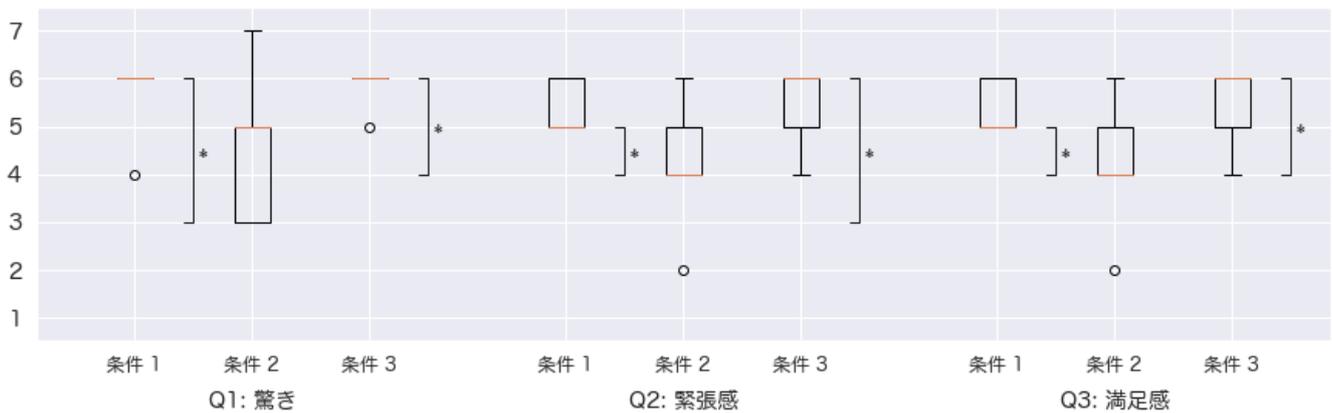


図 8 実験 2 の結果

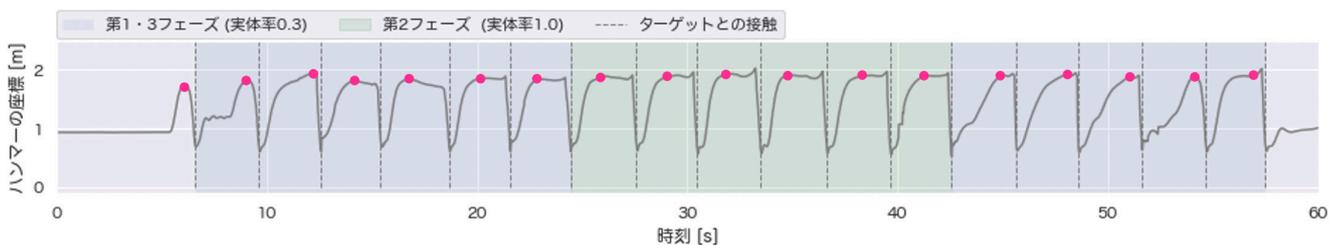


図 9 ある 1 名の実験参加者の条件 1 におけるハンマの座標の変化

一方、実体の数が多くなるほど効果が大きくなるという仮説に反して、実体率 0.3 と実体率 0.7 の間では、驚きの差異が小さかった。実体率 0.3 では分身→分身→実体、実体率 0.7 では実体→実体→分身というパターンが繰り返されるが、いずれも実体か分身のどちらかが 2 回連続して出現するという特徴がある。このことから、断続的な触覚提示による驚きの効果をより大きくするためには、実体率よりも触覚提示の種類（触覚あり・なし）の連続性のほうが重要であることが示唆される。つまり、実体と分身のうち、少なくともどちらか一方のターゲットが連続的に出現するパターンの有無によって、驚きの大きさが変化すると考えられる。一方、満足感に関しては、実体率 0.3 と実体率 0.7 の間に比較的大きな差が確認され、この主張は当てはまらなかったが、これは上述したゲーム中の物体を全力で叩くこと自体の満足感が影響していると推察される。

5.1.2 実験 2: Multiple Phase

各質問項目に関して、条件 2 よりも条件 1 および条件 3 のほうが回答値が高い傾向が見られたことから、体験中に実体率を変化させることで、ゲームにおける驚き、緊張感、満足感が向上するという仮説が支持された。

実験 1 で実体あるいは分身のみのフェーズは驚きや満足感が小さいことが示されたにも関わらず、それらのフェーズを含む条件のほうが驚きや緊張感、満足感が高いことは、ゲームの印象が各シーンの印象の単純な加算ではなく、シーン間の対比や相乗効果によってもたらされることを示

唆している。

実体率が途中で 0.0 に変化する条件 1 と、1.0 に変化する条件 3 の間の差は全体的に小さかった。このことは、実験 1 より示唆された、実体を連続して叩いた後に分身を叩く場合と、分身を連続して叩いた後に実体を叩く場合は、効果としては等価であるということを示していると考えられる。それに関連して、実体率 0.3 と実体率 0.7 の出現パターンは、ターゲットの触覚の有無について対称であることから、第 1 フェーズおよび第 3 フェーズの実体率が 0.3 ではなく 0.7 の場合でも、同様の効果が生じると予想される。

また、4 名の実験参加者からは、「連続して分身を叩いているときは安心した」、「分身しか来ないときは腕を重力に任せて下げるようにして叩き方を変えた」など、実体率が変化する第 2 フェーズの前後で感情や意識的な行動変化が生じたことを示す感想が得られた。実際、7 名中 3 名の実験参加者において、第 1 フェーズと第 3 フェーズで叩き方が明らかに変化する現象が見られた。図 9 に、その傾向が特に顕著に確認された実験参加者 1 名の、条件 1 におけるハンマの Y 軸方向の座標変化を示す。赤い点はハンマが振り上げ開始後にはじめて達した最高点を表している。第 1 フェーズと比較して第 3 フェーズでは、ターゲットと接触してからより長い時間をかけて振り上げ動作を行っており、静止している時間がほとんどないことが読み取れる。この現象はすべての実験参加者に共通して見られたわけではないものの、出現パターンが同じフェーズであるにも関

わらず叩き方が異なっていたことは、実体率が異なる第2フェーズの挿入による効果を検証するうえで重要であると考ええる。

実験1における実体率0.3, 0.5, 0.7の連続数は高々2回であったのに対して、実験2における最大の連続数は6回と、運動の変化を定着させるために十分な時間が確保されたと考えられる一方、叩き方の変化が生じる、あるいは生じた変化を回復させるために必要な連続数は明らかではないため、今後さらなる検証が必要である。連続数を増加させると1試行にかかる時間が多くなり、実験参加者の身体的・精神的疲労が増加することが想定されるため、休憩時間を設ける、ゲームにやり込み要素を導入する、被験者間実験計画に変更するなどの対応が望まれる。

5.2 今後の課題

5.2.1 空間的な出現パターン

本実験では、実体と分身の時間的な出現パターンによる差異を明らかにするために、実験参加者の移動を禁止したが、空間的な出現パターンも同様にVRゲーム体験の印象に影響を与えると考えられる。例えば、ターゲット同士の間隔や移動範囲の広さによっては、1体ずつ狙って叩く、複数をまとめてなぎ払うように叩くなど、様々な行動変化が生じ、それに伴って体験の印象も変化する可能性がある。

5.2.2 触覚提示の手法による違い

本実験では、触覚の有無の違いを明らかに提示するために、自然で強い刺激が提示可能な遭遇型触覚ディスプレイを用いたが、振動子やエグゾスケルトン型の力覚フィードバック装置をはじめとする他の触覚提示手法を用いた場合でも、同様の効果が生じるかどうかという点について、今後のさらなる検証が望まれる。

5.2.3 既存の心理モデルとの関連性

実験から得られた、触覚の有無によってVR体験の驚きや満足感が変化するという知見のメカニズムを、具体的な心理モデルに結びつけて説明することを目指したい。断続的対価を触覚の有無の時間的な変化によって提示するという手続きは、オペラント条件づけの定比率強化スケジュールに類似している部分があるが、実体および分身がポジティブな因子かネガティブな因子のどちらに該当するのかが明らかではないなど、両者の関係性を議論するには不十分な点が多い。

また、実験2において、時間的な叩き方の変化が生じる傾向が一部の実験参加者に確認されたものの、運動変化と印象変化の因果関係の解明には至らなかった。今後は、本研究で得られた知見を行動分析学分野における既存の心理モデルに対する当てはめて解釈することや、それらを用いて運動変化と印象変化の機序に関する調査を実施したい。その際、SCRや心拍などの生理指標を評価指標として用いることを検討する。

6. おわりに

本稿では、VR空間において触覚提示がある物体を実体、ない物体を分身と名付けたうえで、遭遇型触覚ディスプレイを用いて触覚提示の有無が時間的に切り替わるVRゲームを開発した。また、それによって、VRゲーム体験の驚き、満足感が向上することと、体験中に実体の出現頻度を急激に変化させることで、より強い印象変化が生じることを明らかにした。

謝辞 本研究はJST CREST 人間と情報環境の共生インタラクシオン基盤技術の創出と展開における「限定合理性を超越する共生インタラクシオン基盤(研究課題番号JPMJCR19A4)」として行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 梶本 裕之：触覚・力覚ディスプレイ, 知能と情報, 19巻, 4号, 326-332, (2007).
- [2] Celia Hodent(著), 加藤 諒(編集): ゲーマーズブレイン:UXと神経科学におけるゲームデザインの原則, ボーンデジタル, (2019).
- [3] 杉山尚子, 島宗理, 佐藤方哉, Richard W. Malott, Maria E. Malott: 行動分析学入門, 産業図書, (1998).
- [4] 中谷 智司, 矢野 米雄: ロールプレイングゲームにおけるやる気の持続, 情報処理学会研究報告人文科学とコンピュータ(CH), 33-38, (1993).
- [5] Yuntao Wang, Zichao (Tyson) Chen, Hanchuan Li, Zhengyi Cao, Huiyi Luo, Tengxiang Zhang, Ke Ou, John Raiti, Chun Yu, Shwetak Patel, Yuanchun Shi. MoveVR: Enabling Multiform Force Feedback in Virtual Reality using Household Cleaning Robot. Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, 1-12, (2020).
- [6] Ryo Suzuki, Hooman Hedayati, Clement Zheng, James L Bohn, Daniel Szafr, Ellen Yi-Luen Do, Mark D Gross, and Daniel Leithinger. RoomShift: Room-scale Dynamic Haptics for VR with Furniture-moving Swarm Robots. Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 1-11, (2020).
- [7] Ryo Suzuki, Eyal Ofek, Mike Sinclair, Daniel Leithinger, Mar Gonzalez-Franco. HapticBots: Distributed Encountered-type Haptics for VR with Multiple Shape-changing Mobile Robots. UIST '21: The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. ACM, 1269-1281, (2021).
- [8] 坂上 貴之, 井上 雅彦: 行動分析学:行動の科学的理解を目指して, 有斐閣アルマ, (2018).
- [9] Schüll, Natasha Dow: Addiction by design, Princeton University Press, (2012).