

先端伸縮型仮想物体接触デバイス ExtickTouch の評価

片岡 敬志郎*1 大槻 麻衣*2 柴田 史久*1 木村 朝子*1

Abstract --- VR において、表現力豊かで汎用的な触力覚を提示するデバイスの実現は重要課題である。しかし、視覚や聴覚情報に比べて、触覚情報は提示できる情報が限定されており、未だ発展途上である。我々は、仮想物体に触れた際に得られる接触感の再現を目的とし、それを実現する手法の提案とデバイスの試作を行ってきた。具体的には、VR 空間で仮想のデバイスが仮想物体に接触した際に、実世界のデバイスを伸縮させることで実物体と接触させ、生じた反力を接触感として提示する手法を提案し、この手法を実現するデバイス「ExtickTouch」の設計・開発を行った。本研究では、実験によって、提案手法が仮想物体との接触感を提示できていること、およびその接触感が同形状の実物体に触れた場合と最も類似していることを確認した。

Keywords: VR, 触力覚, デバイス

1 はじめに

CG (Computer Graphics) や HMD (Head Mounted Display) の技術の進歩と、安価な HMD の普及により、VR (Virtual Reality; 人工現実) の映像面での表現力は大いに向上した。一方で、VR 空間内で得られる触覚情報は、視覚情報に比べ再現することが難しい。

市販の HMD を用いた VR 体験には、把持して利用できるハンドヘルド型のデバイスが用いられることが多く、主に振動を用いて触覚の提示を行われている[1]。また、同様に把持して用いることが可能なデバイス[1]–[3]や手に装着するデバイス[4]–[6]が、多数提案・開発されてきた。このようなデバイスは、ユーザの動きに対する制限が少ないという利点がある一方で、触覚の提示箇所はデバイスと指との接触位置のみに留まり、実物体に触れたときのように腕全体に力覚を提示することはできない。また、現実に近い力覚を提示可能にしたデバイス[7], [8]も同様に多数提案・開発されてきたが、機構全体が大きく、容易に動かさないため、ユーザの作業範囲がデバイスの可動領域に限定されてしまう。

このように、把持するだけで手軽に利用できるデバイスと、現実に近い感覚を提示できるデバイスでは、2 つの長所がトレードオフとなっていた。そこで我々は、その両方の長所を活かした手法を提案し、この手法を実現するデバイス「ExtickTouch」(図 1) の試作を行った[9]。ExtickTouch は、ユーザが仮想物体に触れた瞬間に、先端を伸縮させて実物体に接触するようにし、その反力を利用することでユーザ

に接触感を提示する。さらに、1 点で触れる動作だけでなく、仮想物体をなぞるような動作をした場合は、デバイスを連続的に伸縮させることで、実物体をなぞっているかのような接触感に近づけることが可能である。しかし、従来の研究では、この手法の評価を十分に行えていたとはいえない。

そこで、本研究では試作した ExtickTouch の性能を評価するために、2 つの実験を実施した。実験 1 ではまず、ExtickTouch および既存手法を含む 4 種類の手法が仮想物体との接触感をどの程度提示できているのかを確認し、実験 2 では実物体に触れた感覚と、各手法の提示する接触感との比較を行った。

2 ExtickTouch

2.1 システム構成

ExtickTouch の構成を図 2 に、全体のシステム構成を図 3 に示す。VR 空間でのデバイスの位置・姿勢を取得するために Oculus Touch を使用している。デバイスの伸縮部分には、リニアアクチュエータ (Alps 社製, モータ N フェーダ, RSA0N11M9A0K)



図1 ExtickTouch

Fig.1 ExtickTouch

*1 立命館大学 情報理工学研究科

*2 産業技術総合研究所

を利用し、グルーガンを用いて Oculus Touch に接着、これに 3D プリンタで出力したペン状の先端部と先端部を覆うカバーを取り付けている。このリニアアクチュエータは可動域が 10 cm で、1024 段階で位置を指定することができ、速度を 256 段階で変更できる。提示できる反力は、先端部を停止させる力が最大 100 N、先端部を押し引きする力が最大 50N となっている。先端部の駆動タイミングと停止位置の制御は Arduino で行っている。

デバイスの制御および VR 映像の描画には CPU Intel Core i5-8400, メモリ 16GB, GPU NVIDIA GeForce GTX1080 TI / 11 GB GDDR5X を搭載した Windows 10 pro PC を使用した。VR 空間の構築には Unity ver. 5.6.2f1 (64bit), VR 空間の観察には Oculus Rift CV 1 を用いた。VR 空間の提示および伸縮距離の算出, デバイス先端部の駆動は毎秒 90 フレームで行っている。

2.2 伸縮制御

ExtickTouch の先端部の伸縮量を制御するために、まずは仮想物体とデバイスの接触点を算出する (図 4)。ここで接触点は、デバイスの伸縮部分の後端から先端までを通る方向ベクトル v と接触対象との交点 P_{tip} となる。次に、仮想物体とデバイスが接触したときに、デバイス先端を実世界に配置されている実物体 (例えば机) と接触させるために、先ほど求めたデバイスの方向ベクトル v と実物体との交点 P_{real} を算出する。この 2 つの接触点を算出したのち、2 点間の距離 d を求め、デバイスが伸縮可能な距離であればその距離だけデバイスを伸縮させて実物体に接触させる。この処理を毎フレーム行うことで、仮想物体への接触感提示を実現する。

次に、具体的な処理の流れについて述べる。ExtickTouch を構成する Oculus Touch の座標とデバイスの実測から得られるデバイス伸縮部分の先端座標 P_{tip} と後端座標 P_{end} を通るデバイスの方向ベクトル v と仮想物体との交点 $P_{virtual}$ を求める。また、実世界に配置されている実物体と同じ位置に配置されている仮想物体と、デバイスの方向ベクトルとの交点 P_{real} を算出する。

次に先ほど算出した仮想物体、実物体それぞれの交点 $P_{virtual}$ と P_{real} をもとにデバイスを伸縮させる長さ d を以下の式で求める。

$$d = |P_{virtual} - P_{real}| \quad (1)$$

但し、ここで求めた d は VR 空間内での距離となっているため、このままではデバイスの伸縮を正確に行うことができない。そこで、以下の式を用いて、実世界の寸法に合わせた後、リニアアクチュエータへの信号 l_{sign} へと変換するために 1024 段階に

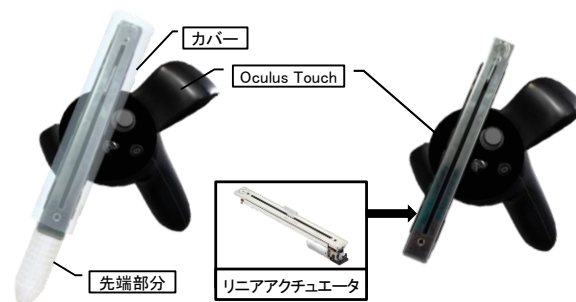


図2 ExtickTouch の構成
Fig.2 ExtickTouch configuration.

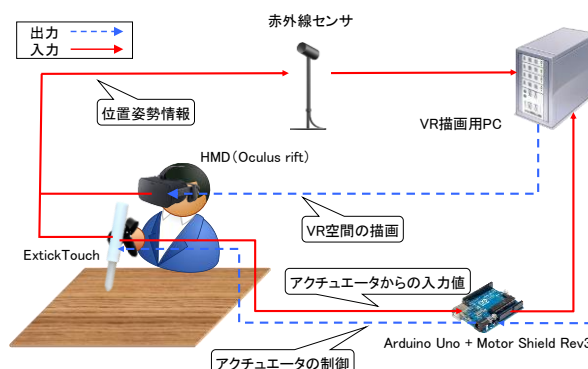


図3 システム構成
Fig.3 System configuration

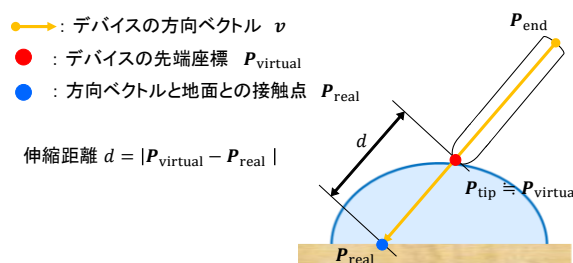


図4 伸縮距離の算出

Fig.4 Calculation of the extension and contraction distance

正規化を行う。

$$l_{sign} = d/l_{device} \cdot 1024 \quad (2)$$

この時、 l_{sign} の値が 1024 を超える場合、今回試作したデバイスでは接触感が提示できないため、伸縮不可と判定する。

3 評価実験

3.1 実験参加者

本実験には、18 名 (男性 15 名, 女性 3 名) が参加し、平均年齢は 22.67 歳 (SD=1.054) であった。実験参加者のうち 1 名は実験 1 のみ参加した。また、1 名は左利きで、他は右利きであり、実験中、参加者はいつでも休憩を取ることができた。

3.2 実験 1

3.2.1 実験目的

ExtickTouch を利用することで、仮想物体との接触感を提示できるのかを確認する実験を行った。また、接触感が得られている場合、どのような要因によるのかを分析するために、提案手法を含めた 4 種類の手法を比較した。また、仮想物体の形状による違いを分析するために、4 種類の形状を用意した。

3.2.2 実験条件

ExtickTouch と接触させる実物体を横 160cm×縦 80cm×高さ 70cm の机の表面とし、この机上で実験を行った。VR 空間上では、実世界の机と同じ位置に仮想の机を配置し (図 5)、参加者はこの机に向かって椅子に座らせた。このとき仮想物体は参加者の正面に配置した。また、ExtickTouch が提示する接触感は、先端の伸縮による触覚提示と仮想物体を表示することによる視覚刺激の組み合わせに由来すると考えた。そこで、それぞれの効果を分離するために、以下の 4 条件を設定した (図 6)。いずれの条件でも、実験参加者は実世界では ExtickTouch を把持する。

(1)ExtickTouch+視覚有 (ExT 視有):仮想デバイスの先端で仮想物体に触れる。実世界では接触している仮想物体の形状に応じてデバイスが伸縮する。

(2)ExtickTouch+視覚無 (ExT 視無):仮想デバイスの先端で、透明化した仮想物体に触れる。実世界では接触している仮想物体の形状に応じてデバイスが伸縮する。

(3)振動:仮想デバイスの先端で、仮想物体に触れるとデバイスが振動する。その際、実世界ではデバイスの先端の伸縮は行わない。

(4)視覚のみ (視のみ):仮想デバイスの先端で、仮想物体に触れるが、触覚の提示は行わない。

また、4 種類の形状の仮想物体を作成した (図 7)。4 種類の提示手法に慣れるための練習として平面を用いた。三角柱は傾きのある平面、四角錐は角、半球は曲面を強調した形状として用意した。

3.2.3 仮説

実験 1 では、以下の 3 つの仮説を立てた。

- ・仮説 1: ExT 視有は、他の手法と比較して接触感と現実感の両方で評価が高く、特に、5.2.2 節で述べた視覚と触覚の組み合わせに加えて、実際の物体との接触感が単なる振動よりも明確な刺激となるため、仮想物体の表面に触れている感覚を感じやすくなる。

- ・仮説 2: ExT 視無は、ExtickTouch からの触覚提示と可視化された仮想物体の組み合わせの影響が大きいため、すべての条件において ExT 視有よりも評価が低くなる。

- ・仮説 3: 従来方法である振動は、デバイスの形状変化を伴わないため触覚の提示が瞬時に行われ、

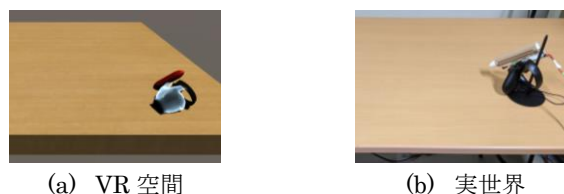


図5 実験 1 の実験環境

Fig.5 Experimental environment of Experiment 1

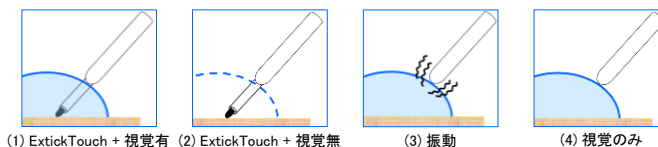


図6 実験に用いた 4 手法

Fig.6 Four methods used in the experiment

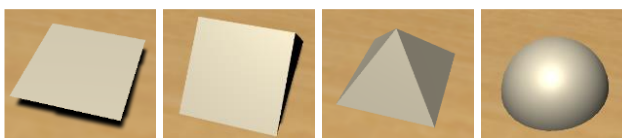


図7 仮想物体の形状 (平面, 三角柱, 四角錐, 半球)

Fig.7 Shapes of virtual objects

(plane, triangular prism, pyramid and hemisphere)

仮想物体の表面位置の認識において ExT 視有よりも優れている。

3.2.4 実験手順

まず、実験参加者に年齢・性別・利き手・VR 利用経験のアンケートと同意書を記入させた。続いて、実験内容について説明した。

平面を使って 4 種類の提示手法の練習を行い、その後 12 試行 (3 形状×4 手法) 行った。形状はランダムに提示し、各形状内の 4 手法もランダムに提示した。その形状と手法の組み合わせで、仮想物体を 1 分間自由に触れさせた後、8 つの質問に回答させた。全試行終了後にコメントの聴取を行った。

各試行で行う質問は、接触感・現実感・表面位置の認識・表面接触の容易さについて各 2 個ずつ、計 10 個行った。表面位置の認識は、仮説 3 を確認するために採用し、表面接触の容易さは、仮説 2 の確認のために採用した。それぞれ、具体的な質問は、表 1 に示す。回答は 5 段階のリッカート尺度で行い、質問の順序はランダムで提示した。

3.2.5 実験結果

Q1-Q8 を 5 段階で評価させた結果を図 8 に示す。グラフの縦軸が評価値を表しており、横軸は仮想物体の形状を表し、それぞれの形状毎に 4 種類の提示手法の評価値を記載している。

評価値の分析は、触覚提示手法 (4 水準) として、フリードマン検定を行った。その結果、触覚提示手

表 1 実験 1 の質問
Table 1 Experiment 1 Questions

質問内容	質問項目
Q1. 目の前にある仮想物体に触れているように感じた	接触感
Q2. 把持しているデバイスが仮想物体に触れているように感じた	
Q3. 得られた触感は、実物体に触れた感覚と同じだった	現実感
Q4. 見た目から想像する触感と比べて違和感はなかった	
Q5. 仮想物体の表面位置がどこにあるかわかった	表面位置の認識
Q6. 仮想物体表面に常にデバイスが当たっているように感じた	
Q7. 仮想物体表面でデバイスを保持することは簡単だった	表面接触の容易さ
Q8. 仮想物体表面をなぞることは容易だった	

法で主効果が優位であった。また、触覚提示パターン間の有意差を確認するため、下位検定として Bonferroni の方法を用いた Willcoxon の符号付順位和検定を行った。

3.2.6 考察

まず、質問に対する回答について述べる (図 8)。ExT 視無と振動の間には、ほとんどの場合で有意な差は見られなかった。また、ExT 視有と ExT 視無、ExT 視有と視のみは、全ての質問・条件において ExT 視有の方が有意に高い値を示していた。しかし、ExT 視無と視のみの間には、有意差がないいくつかの条件 (Q5, Q7, Q8 (球体を除く)) がある。また、その条件において、ExT 視有と振動の間に有意差はない。表面位置の認識 (Q5) と表面接触のしやすさ (Q7, Q8) では、ExT 視無と視のみよりも ExT 視有と振動の方が優れていることがわかる。このことは、ExT 視有と振動のような「触覚フィードバック + 視覚」が、仮想物体の表面に触れ、その表面を認識するのに適していることが示唆されている。したがって、仮説 2 は支持でき、ExtickTouch 以外の他の触覚フィードバックであっても、仮想物体表面をなぞったり、表面でデバイスを保持することが容易になったと考えられる。

半球における条件では、ExT 視有は、Q5 の振動を除き、他の方法よりも有意に高い評価を得た。これは他の形状よりも良い結果であり、形状別に見ると、半球が最も実験参加者に好まれた結果である。

次に、各質問項目について述べる。まず、接触感についての質問 (Q1, Q2) について述べる。ExT 視有は、Q1, Q2 共に多くの場合で他の方法よりも有意に高い評価を得ています。Q1 の四角錐では、ExT 視有と振動の間に有意差はなかったが、Q2 を考慮すると、デバイスが仮想物体に触れているという感覚は提示できていると考えられる。また、ExT 視無と振動の間には有意差はなく、接触感については同等であることが示唆された。

次に、現実感についての質問 (Q3, Q4) について述べる。他の質問項目と同様で ExT 視有が優れてい

る傾向にあるが、他と比べて全体的に評価値が低い。本実験で提示した触覚は、現実の触感と同程度までのリアリティは有していないことが示唆されている。

これらの結果は、接触感と現実感についての仮説 1 を支持するものである。

次に、表面位置の認識についての質問 (Q5, Q6) について述べる。Q5 については「触覚フィードバック + 視覚」を提示している ExT 視有と振動が優位であった。これは、仮説 3 を部分的に支持しているが、振動が ExT 視有を完全に上回ったわけではない。一方、Q6 では ExT 視有の評価が有意に高く、常にデバイスが当たっているという感覚の提示については、ExT 視有の評価が有意に高いことが示唆されている。

最後に、表面接触の容易さについての質問 (Q7, Q8) について述べる。Q7 デバイスを仮想物体表面で保持する容易さについて、ExT 視有は半球のみで有意に高い評価を得ている。これは、モータの出力が低く腕を十分に押し返し、角を提示できない場合があるからである。一方、Q8 の表面をなぞることの容易さについては、ExT 視有の評価が有意に高く、なぞる動作に提案手法が適することが分かる。

次に、全試行が終了した後に実験参加者から聴取したコメントについて述べる。ExtickTouch で触れた際に得られた感覚について、形状による違いについて多くの実験参加者が言及していた。最も評価が高かった形状として、7 名が半球、4 名が三角柱、3 名が四角錐を挙げていた。このことから、質問項目についての考察であったように、提案手法で提示する形状として半球が適していると考えられる。

3.3 実験 2

3.3.1 実験目的

実験 1 では、ExtickTouch が仮想物体との接触感を提示できることを確認できたので、次に実物体との感覚の違いの確認を目的とした実験を行う。この実験では、ExtickTouch が提示する接触感がどの程度実物体の接触感と類似しているかの確認を行い、先端伸縮機構の表現する現実感の限界などを明らかにする。実験協力者は実験 1 と同様である。

3.3.2 実験条件

環境や提示手法、提示形状は、実験 1 と同様の条件で行った。実験 1 と異なるのは、実物体を用いたことである (図 9, 10)。実験 1 で使用した形状と同じ形状の実物体を用意した。半球は、プラスチック容器を用いており、デバイスと接触した際に大きな音が鳴らないように容器内に紙粘土を詰めている。それ以外の形状は、3D プリンタで作成した形状にプラスチックの板を張り付けている。これは、半球

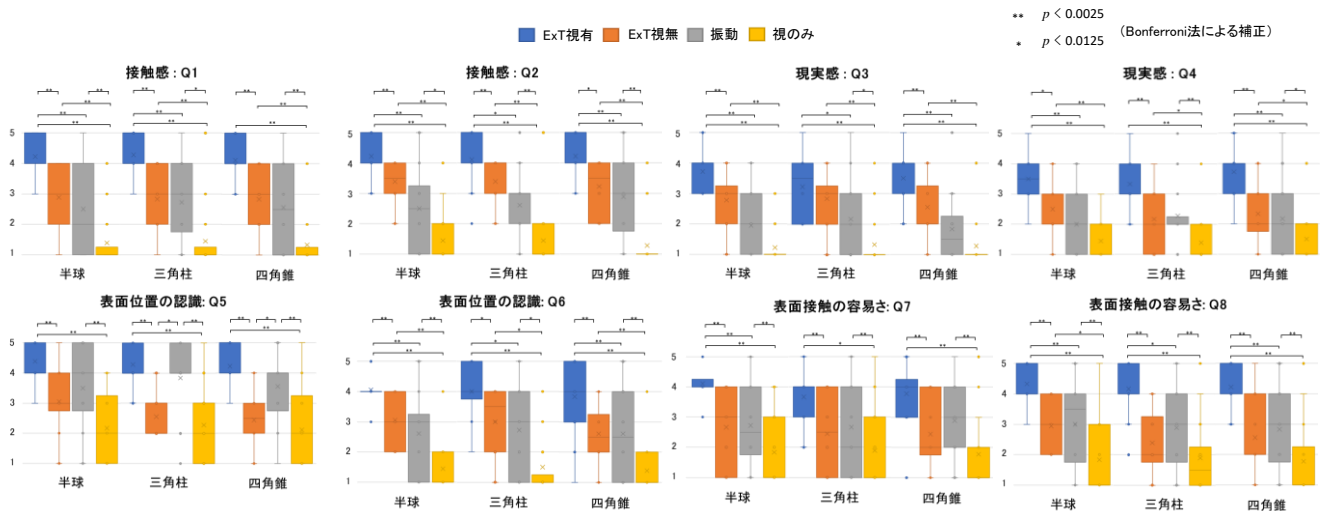


図8 実験 1 結果

Fig.8 Results of experiment1

と表面情報をそろえるためである。実験において実物体を提示する際は、この実物体を仮想物体が表示されるのと同じ位置に設置した。

3.3.3 仮説

実験 2 では、以下の 2 つの仮説を立てた。

- ・仮説 4：実験 1 の結果を考慮すると、実物体に最も近い感覚を提示できるのは ExT 視有である。
- ・仮説 5：その次に実物体に近いのは、視覚と触覚の組み合わせを提示している振動であり、さらにその次に ExT 視無、視のみとなる。

3.3.4 実験手順

実験 2 の手順を以下に示す。まず、形状を 1 種類ランダムに選択し、先端伸縮を行わないデバイスの先端で実物体を納得のいくまで触れさせる。この時、実験参加者は HMD を装着しており、実物体と同じ位置に配置された仮想物体を視認している。次に、実物体を取り除き、接触感提示の手法から 1 種類を選択し、仮想物体を 1 分間自由に触らせる。最後に、質問用紙に回答させる。これを 1 試行とし、実物体に触れる部分から、接触感提示手法 4 種類分繰り返す。形状を変更して再度繰り返す。この手順を習熟するために、初めに平面で各接触感提示手法を体験させた。全試行終了後、コメント聴取を行った。

各試行で行う質問は、実物体との類似度を VAS(Visual Analog Scale)にのっとして 101 段階で回答させるものである[10]。一番左の 0 が触覚を全く感じなかったこと、一番右の 100 が実物体と同様の感覚があったことを示す直線を提示し、参加者が得た感覚の強さを示す位置にバツ印をつけさせた。

3.3.5 実験結果

実験 2 の結果を図 11 に示す。グラフの縦軸が 101

段階の評価値を表しており、横軸は仮想物体の形状を表し、それぞれの形状毎に 4 種類の接触感提示手法の評価値を記載している。評価値の分析は、提示手法 (4 水準) として、フリードマン検定を行った。その結果、触覚提示手法で主効果が有意であった。また、提示手法間の有意差を確認するため、下位検定として Bonferroni の方法を用いた Wilcoxon の符号付順位和検定を行った。

3.3.6 考察

すべての組み合わせで有意差があり、評価の高い順に、ExT 視有、ExT 視無、振動、視のみとなった。したがって、仮説 4 は支持されたが、仮説 5 は支持されなかった。仮説 5 は、視覚の影響を考慮したものであったが、実験での質問項目は、実物体から得られる触覚との比較だったため、実験参加者は触覚のみに集中して回答していた可能性がある。そのため、視覚の影響が低下し、実験 1 では見られなかった、ExT 視無と振動の違いが表出したと考えられる。

次に、全試行が終了した後実験参加者から聴取したコメントについて述べる。実験 1 と同様に、ExtickTouch で触れた際に得られた感覚について、5 名の実験参加者が半球を高く評価しており、そのうち 2 名は練習に用いた形状である平面も同様に高く評価している。これは、実験 1 で曲面として提示された半球が高く評価されたことと一致しており、ExtickTouch は既存手法よりも表面が滑らかな形状の表現に適していると言える。

実験 1 と異なり実物体を用いたことの影響について、「接触感提示法と接触感の比較がしやすい」と 3 名の実験参加者が述べている。また、2 名の実験参加者から「仮想物体にデバイスが侵入しやすいため、

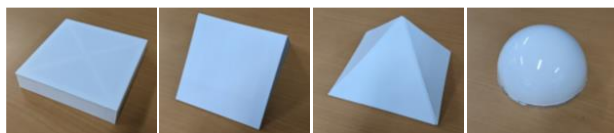


図9 実物体の外観
Fig.9 Actual objects



(a) VR (b) 実世界

図10 実験 2 の実験環境

Fig.10 Experimental environment of Experiment 2

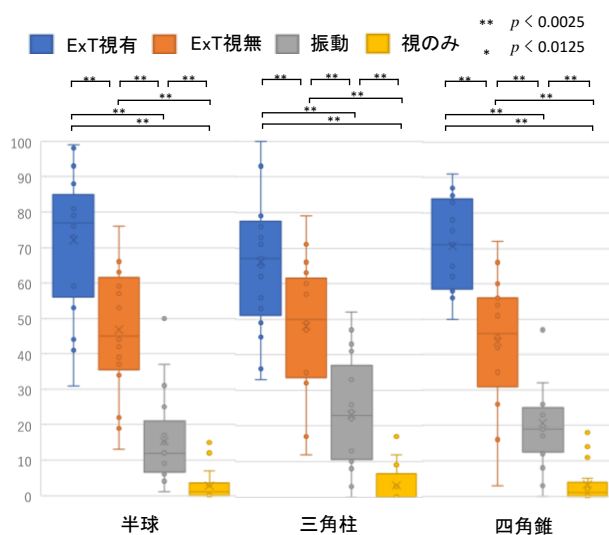


図11 実験 2 結果

Fig.11 Results of experiment2

振動や視のみは現実感を得られなかったのに対し、ExT 視有や ExT 視無は表面でデバイスが停止するため、よりリアルに近いと感じた」とのコメントが得られた。仮想物体表面で完全にデバイスを保持できなかったとしても、表面付近でフィードバックを与えることで、提示した接触感を実物体に近い感覚として表現できることが分かった。また、振動について、2 名の実験参加者が、意識して表面に沿わせようとする表面の知覚は可能と述べている。これは、実験 1 の仮説 3 を支持する内容でもある。

4 むすび

本稿では、HMD を装着するタイプの VR 体験において、ユーザの動きをできるだけ制限することなく、仮想物体との接触感を腕全体に提示可能な手法を実現する試作デバイス「ExtickTouch」の評価を行

った。2 つの実験を実施した結果、提案手法が仮想物体との接触感を提示できていること、およびその接触感が同形状の実物体に触れた場合と最も類似していることを確認した。また、既存手法よりも表面が滑らかな仮想物体の提示に適していることが明らかになった。さらに、振動との組み合わせや提案手法の特徴である実物体との接触を活かすことで、提示する触覚情報をより現実にならされる可能性も示された。

参考文献

[1] E. Whitmire *et al.*: “Haptic Revolver: Touch, Shear, Texture, and Shape Rendering on a Reconfigurable Virtual Reality Controller,” Proc. 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, paper. 86 (2018)

[2] H. Benko *et al.*: “Normaltouch and texturetough: High-fidelity 3d haptic shape rendering on handheld virtual reality controllers,” Proc. 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 717 - 728 (2016)

[3] S. Kamuro *et al.*: “An ungrounded pen-shaped kinesthetic display: Device construction and applications,” In IEEE World Haptics Conference (WHC) 2011, pp. 557 - 562 (2011)

[4] I. Choi *et al.*: “Wolverine: A wearable haptic interface for grasping in virtual reality,” in IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 986–993 (2016)

[5] I. Choi *et al.*: “Gravity: A wearable haptic interface for simulating weight and grasping in virtual reality,” Proc. 30th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 119–130 (2017)

[6] I. Choi *et al.*: “CLAW: A multifunctional handheld haptic controller for grasping, touching, and triggering in virtual reality,” Proc. 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, paper. 654 (2018)

[7] “Phantom Premium Haptic Devices.” <https://www.3dsystems.com/haptics-devices/3d-systems-phantom-premium> (accessed Dec. 09, 2020).

[8] M. Sato, “SPIDAR and virtual reality,” Proc. of the 5th Biannual World Automation Congress, pp. 17-23(2002)

[9] 片岡ら, “ExtickTouch: 仮想物体への接触感を提示する先端伸縮型デバイスの開発,” In WISS2019, pp. 3-8 (2019)

[10] K. A. Lee *et al.*: “Validity and reliability of a scale to assess fatigue,” Psychiatry Res., vol. 36, no. 3, pp. 291–298 (1991)