

指を鉋に見立てる 触覚提示デバイスの提案

近藤芳信^{†1} 柳田康幸^{†1}

じゃんけんのチョキの手には鉋のイメージが広く定着している。しかし、実際に指を鉋などの刃物にすることは非現実的であるため、指全体でものを切断する体験を提供するためのインタラクティブコンテンツを開発した。現実で使用する鉋と異なり、振動が指全体に伝わり、かつ切断物質が指に触れている必要があるため、本研究では専用の触覚提示デバイスを開発し、その感覚提示手法に対する性能を評価した。

1. はじめに

じゃんけんの手にはそれぞれモチーフがあり、中でもチョキの手の形には鉋のイメージがついている。しかし、現実には指を鉋などの刃物にすることは不可能である。

このような実空間上では不可能な事象を体験可能にする技術として、バーチャルリアリティ (以下: VR) が挙げられる。VR を用いて「チョキの手が鉋になる」イメージを実現するために、チョキの手、すなわち中指と人差し指を鉋の刃に見立て、指による切断感覚を提供するインタラクティブコンテンツを提案する。このコンテンツの成立により、現実にも用いられる手で持つ鉋とは異なる指全体での切断を行い、指が刃物になっている非現実的な体験を提供できることが期待される。

ここで指を鉋に見立てるにあたり、通常の手で持つ鉋を使用する際の感覚との違いを考える。違いの一つとして、触覚刺激の性質や場所が挙げられる。手で持つ鉋は切断の際に力点である持ち手に振動が伝わるが、指を鉋とすると通常の際における作用点である刃の振動が直接指に伝わり、また、手で持つハサミを使用する際には切断物に触れるのは刃の部分であるが、この見立ての考え方では中指・人差し指が鉋の刃となるため、指を閉じる際に切断物質が指に直接触れている必要がある。

上記の感覚を提示するために、指に装着する専用の触覚提示デバイス (以下: チョキデバイス) を開発した。チョキデバイスによって、2 本の指全体に刺激を与え、切断時の刃全体の振動を強調し、かつ接触を再現することで、指で切断する感覚を表現することを本研究の目的としている。

本稿では提案した VR コンテンツ、チョキデバイスによる感覚提示手法、及び提示手法に対する性能評価について述べる。

2. 関連研究

VR 空間上の紙を手で持つタイプの鉋によって切断する感覚を提示するデバイスは開発されている。若松らは、鉋

による物体の物理的機構と感覚を提示するために、抵抗感を伴って仮想物体を切断するシステムを開発している[1]。この研究では持ち手の振動ではなく切断に伴う抵抗感に焦点を当てており、手で持つタイプの鉋による切断感提示には抵抗感が重要であると考えられる。抵抗感提示の考えは本研究でも有用である反面、指を鉋にする上では先述の通り抵抗感のみでは感覚として不十分であると考えられる。

また、田中らは切断対象との接触の提示を振動によって行うナイフ形対話デバイスを作成している[2]。ナイフ形のデバイスに振動子を組み込み、接触に際して駆動させることで接触感を向上させている。振動による接触感という点は本研究に必要な観点であり、これを道具ではなく指に提示することと、ナイフのなぞり動作と鉋の開閉動作による違いを出す必要がある。

3. コンテンツ概要

図 1 にシステムの構成図を示す。体験者は HMD 及びチョキデバイスを装着して体験を行う。切断はチョキデバイスを操作することによって行う。

コンテンツはじゃんけんをモチーフとしており、切断対象を紙、岩としている。初期段階では紙は切断可能だが、岩の切断が不可能であり鉋の動作は停止する。別途制作した「砥石デバイス」を利用することで岩も切断することが可能となり、これによって岩を切断することでコンテンツが終了となる。なお、本稿の実験においては紙の切断感覚についての評価実験を行っている。

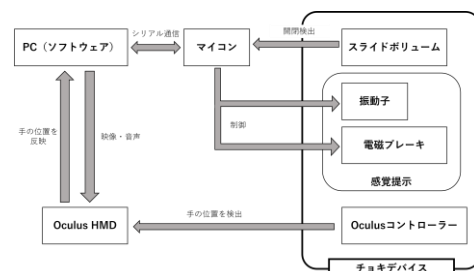


図 1 システム構成

^{†1} 名城大学

4. デバイス概要

(1) チョキデバイス

チョコキデバイスは Oculus コントローラー、電磁ブレーキ、スライドボリューム、4 つの振動子（アルプスアルパイン社製ハプティックリアクタ）で構成されている（図 2）。

中指・人差し指の先端には平常時には少ない抵抗で指の開閉動作が行えるように、マジックハンド機構を採用している。マジックハンド機構の先端とスライドボリュームのつまみを繋げることで、指を閉じる際につまみが指の先端方向に動き、開くと指の根元の方向に戻る仕組みとなっている（図 3）。つまみの前後動作もマジックハンド機構により抵抗感なく行える。指の開閉検出はスライドボリュームで行われており、前述のつまみの移動とリンクして VR 上の指が開閉する。

また、電磁ブレーキにはゼンマイばねが取り付けられており、そこから糸がスライドボリュームのつまみへ繋がっている。ゼンマイばねは閉じる際の抵抗感を低減させるために弱いものを使用している。糸は指を閉じる際につまみに引かれて伸び、指を開くとゼンマイばねによって引き戻される。指を閉じている際に電磁ブレーキがかかると糸が伸びなくなり、マジックハンド機構及びつまみが動かなくなる（図 4）。

振動子は中指・人差し指の根元・先端にそれぞれ一つずつ、計 4 つを指に取り付け、振動刺激を提示する。振動については後述する。手の位置検出は Oculus コントローラーによって行う。

(2) 振動子による提示方法

指への振動刺激方法として複数点を時間差で刺激すると刺激が移動しているように知覚する「触仮現運動」と 2 点を同時に刺激するとその中心に刺激を知覚する「ファントムセンセーション（以下：PhS）」を採用している[3]。図 5 にこの二つの触覚のイメージ図を示す。

紙を切断する際には指の根元から先端にかけて振動させることで、触仮現運動による振動の移動で紙との接触を再現する狙いである。振動の強度や持続時間、間隔を変化させることで切断している物質の性質を変化させられると考える。本稿では主にこの手法における評価を行っている。それに際する振動の条件などは後述する。

岩の接触時にはブレーキ駆動に合わせて指の根本・先端を同時に振動させることで、PhS の刺激像による対象との接触を再現する。振動の強度を変えることで接触位置の調整も可能と考える。特に振動子をつけていない指の中間部に接触感を与える効果が最も期待される。加えて、振動によって岩に触れた際の衝撃や指が金属になっている感覚も目指している。ただし、本稿では岩との衝突時についての実験は行っていない。

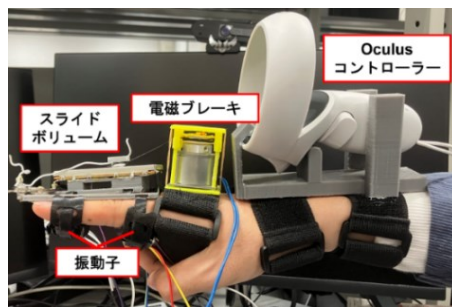


図 2 チョキデバイス装着図

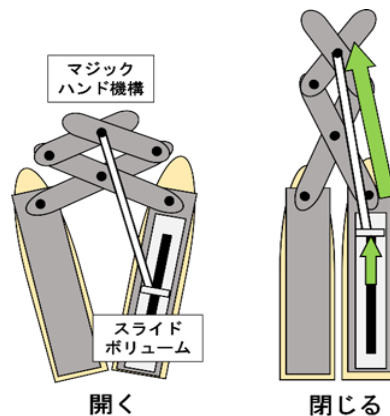


図 3 開閉動作イメージ図

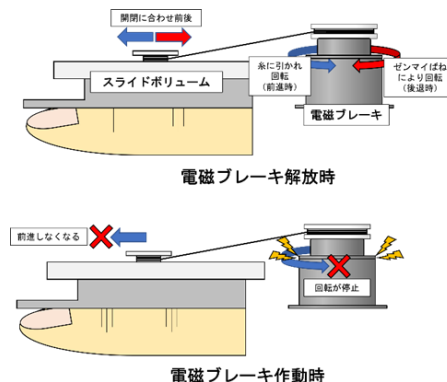


図 4 電磁ブレーキ動作イメージ図

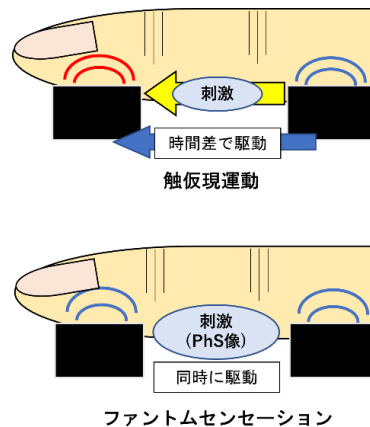


図 5 触仮現運動とファントムセンセーション

5. 評価実験

5.1 実験概要

紙を切断した際に発生する振動に対する評価実験を行った。紙は指を閉じることで切断することが可能であり、その際に指の根本から先端にかけて振動子が駆動する。本システムでは指に振動を与えることで切断対象との接触などの再現を目指している。また、同一の機構で様々な物体の切断・接触を再現することを目指す。そのため、振動の強度や持続時間、間隔を変化させ、振動ごとに接触感や切断物の性質について調査した。

5.2 実験装置

5.2.1 ハードウェア

被験者はチョキデバイスのうち、Oculus コントローラーと電磁ブレーキを取り外したものを装着して評価を行った。紙の切断において電磁ブレーキは不要であるため外している。また、評価項目は振動についてであり、手の移動検出は不要と考えたため Oculus コントローラーも外している。

5.2.2 ソフトウェア

本実験を行うにあたり、先述のコンテンツとは別に、対象を切り続ける専用のソフトウェア(図 6)を使用している。Oculus コントローラーによるトラッキングを除外しているためソフト上の手を動かさない分、指の開閉による切断に集中できる構成となっている。また、後述の振動条件もソフトウェア上で変化させることが出来る。

5.3 計測内容

5.3.1 振動について

振動は Arduino Uno より、250Hz のパルス波を振動子に送ることで振動させている。その際に信号を可変ゲインアンプ(Analog Devices Inc.製 AD605ANZ, 以下:VGA)に經由させ増幅・減衰させることで、後述の振動強度を調整している。VGA による増幅・減衰は送信信号とは異なるパルス波のデューティ比を調整したものをローパスフィルタによって平滑化した電圧によって調整している。

振動の条件として(1)振動強度、(2)振動時間の2つの要因を設定しており、(1)で2条件、(2)で3条件を組み合わせた6パターンの振動について被験者ごとに調査を行った。

(1) 振動強度

振動強度の条件は振動子に流すパルス波の振幅を変化させることで調整を行う「弱」及び「強」の2種類が存在する。それぞれ VGA の調整用電圧が異なり、「弱」は平均 1.04V、「強」は平均 2.22V となっている。以下の図 7 に振動子を指に装着した画像を示す。図 7 には図 8 及び図 9 に示す各軸も示しており、左右方向を x 軸、前後方向を y 軸、上下方向を z 軸とする。振動子を加速度センサー(ATR-Promotion 製 WAA-006)に固定して加速度を 1.5 秒ずつ観測したものを「弱」と「強」、それぞれ図 8 と図 9 に示す。なお、図 8 と図 9 のサンプリング周期は 2ms である。また、

z 軸のグラフについてはおよそ -1 G が無振動時の基準となっている。

図 8 と図 9 を見るといずれも x 軸すなわち左右方向と z 軸すなわち上下方向に強く揺れており、また図 9 のほうが加速度の変位が大きいことがみられ、図 8 のものより強く振動していることがわかる。

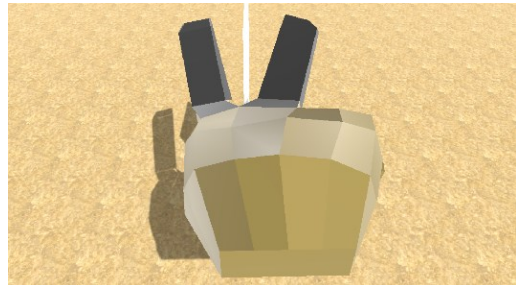


図 6 実験用ソフトウェア

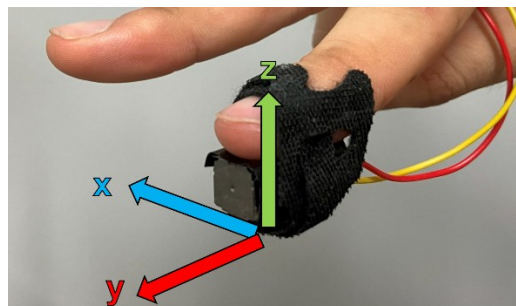


図 7 振動子装着例及び軸方向

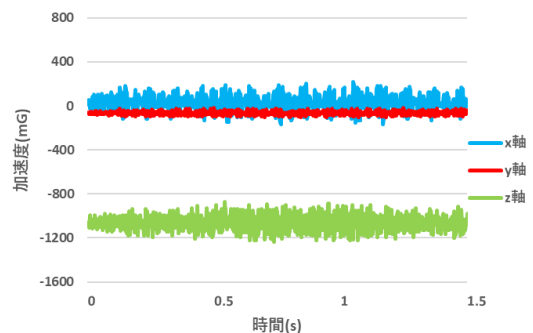


図 8 振動強度「弱」の角速度

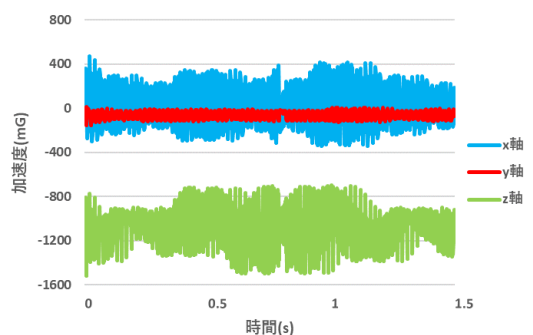


図 9 振動強度「強」

(2) 振動時間

振動時間の条件は3種類あり、そのうち2種類は振動の持続及び根本と先端の振動時間差が固定されたもの(以下:「固定・短」及び「固定・長」)であり、残りの1種類は指を閉じる角度に応じて強度を変化させるもの(以下:「開閉依存」)となっている。「開閉依存」は指を閉じるほど根本の振動が弱まり先端の振動が強まる。表1に各条件の具体的な条件を示す。

表1 振動持続・時間差の条件

	振動持続(ms)	振動時間差(ms)
固定・短	100	100
固定・長	200	200
開閉依存	指を閉じる角度に依存	

「開閉依存」は指の開閉によって前後するスライドボリュームに流れる電圧の値によってVGAの調整用電圧を変化させる。すなわちVR上のバーチャル指の開閉角度に依存している。この状態では物体に触れた段階から振動が開始され、指を閉じ切ることによって振動が終了する。また、強度の最大値は(1)の条件によって決まる。以下の図10から図13は接触からバーチャル指を15度閉じることで切断が完了する状況における、バーチャル指を閉じた角度ごとの振動強度である。

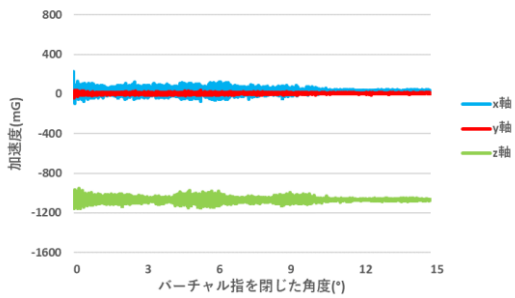


図10 「開閉依存-弱」条件におけるバーチャル指を閉じた角度に応じる根本の振動子の加速度

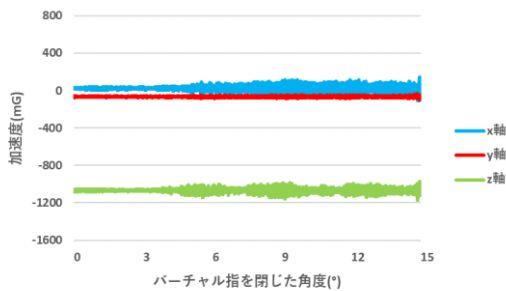


図11 「開閉依存-弱」条件におけるバーチャル指を閉じた角度に応じる先端の振動子の加速度

図10と図11、図12と図13のそれぞれの組み合わせを見ると、閉じはじめは根本の振動が強く、目標の半分程度閉じるあたりで根本と先端の振動が同程度の強度となり、次第に先端の振動のみが発生している。

5.3.2 評価項目

上記の各パターンにおいて、被験者は表2にある質問に対し3を中心とした5段階で回答する。回答は口頭で行う。

表2 評価項目

接触しているか(以下:接触感)		
していない	1~5	している
柔らかさ		
硬い	1~5	柔らかい
薄さ		
厚い	1~5	薄い
切りやすさ(以下:抵抗感)		
切りにくい	1~5	切りやすい
表面感触(以下:滑らかさ)		
粗い	1~5	滑らか
指が刃物になっているか(以下:切断感)		
なっていない	1~5	なっている

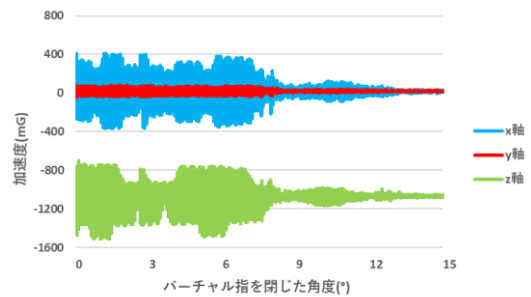


図12 「開閉依存-強」条件におけるバーチャル指を閉じた角度に応じる根本の振動子の加速度

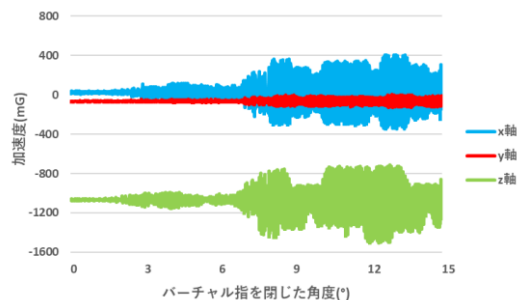


図13 「開閉依存-強」条件におけるバーチャル指を閉じた角度に応じる先端の振動子の加速度

接触感は中指と人差し指の間で切断物のなぞるような接触が感じられたか否かを示し、切断感是指で切断を行っていると感じられたか否かを示している。そのほかの項目は切断物質の特性を示している。全ての項目において5段階で評価を行う。各条件でアンケートに答えるまで同じ条件で何度でも切断を行える。

5.4 実験参加者

本実験の実験参加者は21歳から24歳までの男性9名(平均21.8歳)を対象とした。

6. 結果

初めに、接触感の条件ごとの評価値をまとめた箱ひげ図を図14に、切断感の条件ごとの評価値をまとめた箱ひげ図を図15に示す。また、×印は各条件の評価平均値を示す。双方の「固定・短-弱」条件を除くすべての条件で、評価平均値は基準である3を超えていた。

各条件に対して2要因の分散分析を行ったところ、接触感においては振動強度に対して有意差がみられた($p = 3.40 \times 10^{-2}$)。しかし、接触感の各要素に対してTukeyの多重検定を行ったところ、有意差がみられる組み合わせは確認されなかった。

続けて、図16に柔らかさ、薄さ、切りやすさ、滑らかさといった紙の性質を表す項目のイメージプロフィール図を示す。各条件において評価平均値の線が示されており、線の種類は振動時間(点線は「固定・短」、破線は「固定・長」、実践は「開閉依存」)を示し、色で振動強度(水色は「弱」、橙色は「強」)を示している。振動強度が「弱」である水色の線がすべての項目において「強」である橙色の線より右側にあり、振動強度が弱いと「柔らかい」、「薄い」、「切りやすい」、「滑らか」という評価にまとまっている。

それぞれの要素に対して2要因の分散分析を行った結果、すべての項目に対して振動強度において有意差が確認された(それぞれ $p = 1.15 \times 10^{-5}, 1.81 \times 10^{-4}, 1.51 \times 10^{-4}, 6.32 \times 10^{-5}$)。また、これらの項目にTukeyの多重検定を行った結果、有意差がみられた組み合わせを表3に示す。

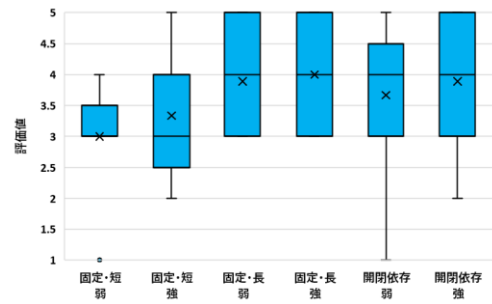


図14 接触感の評価値

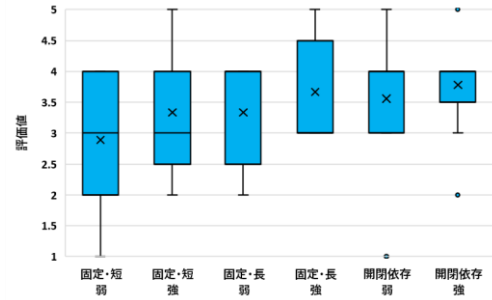


図15 切断感の評価値

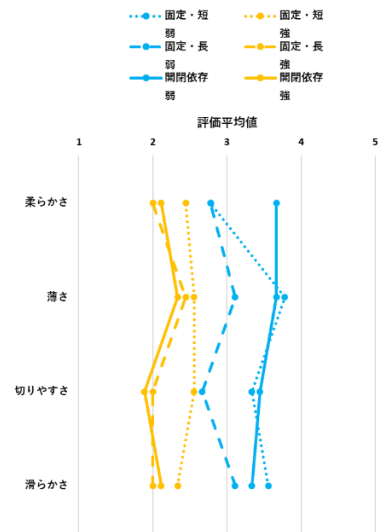


図16 性質の評価平均値のイメージプロフィール図

表3 有意差がみられた組み合わせ一覧

柔らかさ	固定・短-弱	固定・短-弱	固定・長-強	
	固定・長-強	開閉依存-強	開閉依存-弱	
薄さ	固定・短-弱	固定・短-弱	固定・長-強	開閉依存-弱
	固定・長-強	開閉依存-強	開閉依存-弱	開閉依存-強
抵抗感	固定・短-強	固定・長-強	開閉依存-弱	
	開閉依存-弱	開閉依存-弱	開閉依存-強	
滑らかさ	固定・短-弱	固定・短-弱	開閉依存-弱	
	固定・長-強	開閉依存-強	開閉依存-強	

7. 議論

7.1 考察

図 14 及び図 15 の箱ひげ図においてほぼすべての条件において評価平均値が基準である 3 を超えていたことから、根本から先端にかけて振動を起こすこと、すなわち触仮現運動によって接触感や指による切断感を提示できると考えられる。しかし、切断感は分散分析によって条件ごとの有意差が確認されなかった。接触感は強度において有意差が確認され、評価平均値は振動強度が「強」の 3 条件が高いことから、強度が強ければ接触感を得やすい可能性が示唆されている。しかし、Tukey の多重検定では有意差の確認できる条件の組み合わせがみられなかったことから、その具体的な条件は不明となっている。

続けて、図 16 及び分散分析の結果から振動の強度が弱ければ柔らかく薄く滑らかで切りやすいという印象を与え、強ければ硬く厚く粗くて切りにくいという印象を与えるといえる。これによって、同一の機構によって振動の強度を変えることによって紙の性質を変化させることができると考えられる。

7.2 今後の課題・展望

実験において接触感や切断感は一定の水準以上で再現できていたが、評価平均値が 4 を超えたものも少なかったため、向上の余地があると考えられる。切断時の角度に応じて根本と先端の振動強度を変化させる手法を本実験で取ったが、実験中の意見の 1 つとして、これに加えて開閉の速度に応じて最大の強度を変化させることが改善案として挙げられている。そのため、紙の性質を加味した振動強度を再現することが切断感などの向上につながる可能性がある。

また、提案には PhS による岩との衝突感の再現も挙げているが、本稿では実験を行っていない。よって、ブレーキを用いて鋏の開閉を止め、振動強度や振動の持続時間などを変化させながら実験を行う必要がある。

そして、コンテンツを完成させるうえで、岩を切断するなどの現実では実現できない感覚の提示についても検討、および実験を行い、実装を経てコンテンツの完成を目指したい。

8. まとめ

本稿では指を鋏に見立てるエンターテインメントコンテンツ及びデバイスについて提案し、デバイスの評価実験を行った。紙を切断する際には根本から先端にかけて振動をさせることによって接触感や切断感の再現が可能であることが分かった。また、振動の強度を変えることで紙の性質を変化させることができることも判明し、同一の装置で切断対象を変化させることができる可能性に至った。今後はコンテンツの提案にある通り、岩との衝突感や岩を切断するなどの再現方法について検討し、コンテンツの完成を目指

す。

参考文献

- 1) 若松秀俊, 安名正和: 鋏状デバイスによる紙状立体仮想物体の切断感覚の実現システム, 電気学会論文誌C (電子・情報・システム部門誌), Vol. 116, No. 10, pp. 1163–1168, (1996).
- 2) 田中和樹, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: 仮想物体への接触感提示を実現したナイフ型対話デバイスの開発, 日本バーチャリアリティ学会大会論文集. Vol. 17, pp. 227–230, (2017).
- 3) 橋本悠希: 錯覚を利用した触覚インタフェース, 電子情報通信学会誌, Vol. 104, No. 2, pp. 156–161, (2021).