

手首装着型デバイスを用いた擬似触覚提示手法

古部 正志郎¹ 坂野 鋭² 平川 正人²

概要: 機械の組付け等の学習のためには、バーチャルリアリティ (Virtual Reality, 以下, VR) を用いたシミュレーションが有効であることが知られている。特に尖った金属部品のようなものの組付けの際には接触による手指の怪我の危険性を直感的に学習出来るため、労働災害の減少のために有効であると考えられる。ところで、現状の VR システムではヘッドマウントディスプレイ (以下, HMD) システムから視聴覚情報のみを提供している。これでは怪我に至る様な情報を十分にリアルに与えることは難しい。近年提案されている触覚デバイスを用いてバーチャルオブジェクトとの接触情報を提示することもできるが、手指の動作制約から装着感がストレスとなって、組付け作業をシミュレーションするには不十分である。そこで本研究では、デバイス装着による動作制約の少ない手首への振動刺激パターンによって、手指への擬似的な触覚を与える手法の提案を行う。評価の結果、振動パターンの違いによる形状把握については期待するレベルには達していなかったが、デバイスを装着していない時と比べて、装着によるストレスを与えずに高い接触感を提示出来ることがわかり、組付け作業のシミュレーションに応用できる可能性が示唆された。

1. はじめに

製造業において、組付け作業による切れ、こすれといったような怪我が報告されている [1]。組付け作業の難易度が上がるほど、怪我のリスクは高くなり、未然に防ぐための教育にかかる時間も増えてしまう。この問題を解決するために、VR を用いる手法が考えられる。

近年の VR では、Oculus Quest2[2] や HTC VIVE Cosmos[3] などの HMD を使用して視聴覚情報を提示する方法が広く普及している。HMD を利用した VR では、ディスプレイを介して提示されるバーチャル空間を利用者は 1 人称視点で観測することで、その空間内にいるかのような没入感を体験することができる。その特性から、VR は製品評価やプロトタイプングに利用されることが多く [4]、産業分野でコスト削減や製造期間の短縮といった効果を得ることが期待される [5], [6]。なかでも VR 組付けシミュレーションは、鋭利な部品との接触による怪我の危険性を直感的に学習できるため、労働災害の教育コストの削減を見込むことができる。しかし、HMD から提示される視聴覚情報のみでは、現実と見まごうような体験を行うことは難しく、視聴覚以外の感覚提示を行うことは、より高度で現実に即した組付けシミュレーションを達成する上で避けて通

れない。なかでも、手指の体性感覚はバーチャルオブジェクトの存在感や形状を提示するために重要な要素であり、高い再現度の触覚を提示するデバイスが数多く提案されている [7], [8]。ただしそれらのデバイスは、デバイスの装着方法の観点から手指の動作制約が多く、実際の製品評価やプロトタイプングへの適用には不十分である。

上記の問題を解決する方法として、擬似触覚を用いることでデバイスの小型化を図り、手指の動きへの制約を小さくする手法が考えられる。従来研究では、擬似触覚提示手法として視覚と触覚によるクロスモーダル現象を用いたものや刺激を提示した箇所と別の箇所に触覚を知覚させる触覚転移が提案されている。

本研究の目標はプロトタイプングの中でも特に組付けシミュレーション時に有効な触覚デバイスを作成することである。そのためには、デバイス装着への煩わしさ低減、手の可動域の確保、接触感や把持感が知覚できる触覚フィードバックのすべてが満たされる設計を行う必要がある。これを満たすため、5つの振動パターンによる触覚刺激を提示する手首装着型触覚デバイスを設計し、従来触覚デバイスとの比較を行う。また、VR 環境において本プロトタイプが提示できる擬似触覚及びデバイスの装着感をユーザ評価によって調査を行う。

2. 研究背景

2.1 VR 組付けシミュレーションにおける問題点

産業分野の中でも製造業の組付け作業は、金属部品など

¹ 島根大学自然科学研究科
Graduate School of Natural Science and Technology, Shimane University

² 島根大学学術研究院理工学系
Shimane University

の尖った箇所との接触によって手を怪我してしまう危険性を伴う。実際に、「組立ラインで作業中、板金部品の取り付けをしていたが、難易度の高い作業であった為、手元が狂い鋭利な面と接触し切った。」といった報告がある [1]。このような怪我の危険性を前もって意識付けるために、VR によるシミュレーションを用いることが期待される。VR であれば、現物を用意する必要がなく、CAD で作成した 3D モデルを流用できるといった利点があるため、コスト削減や導入のしやすさの観点で有効である。しかし、従来の VR システムを組付けシミュレーションに応用するためには、バーチャルオブジェクトに触れた感覚を提示することができ、手指の動作制約がないデバイスを用いる必要がある。

2.2 触覚デバイス

近年、高い再現度で手指への体性感覚を提示できる触覚デバイスが提案されており、把持型 [7], [9], 外骨格型 [10], [11], 指先装着型 [12], [13], 手首装着型 [14], [15], 設置型 [8], [16] など装着方法も様々である。なかでも、手首装着型の触覚デバイスは手に直接装着しないため、手指の動作制約が少ないといった利点がある。また、腕時計のように手首に身に付けることに人間は慣れているので、ユーザにとって馴染みやすい設計が可能である。組付けシミュレーションにおいて、普段装着することのないデバイスの装着感はシミュレーションの精度を下げる要因となり得る。手首装着型の触覚デバイスは、この問題を解決できる装着方法であると考えられる。

2.3 擬似触覚による提示手法

触覚刺激を与えたところとは別の箇所に触覚を提示する触覚転移といった手法が提案されている。森山 [17] らは背中に 144 個の振動子設置し、手のひらや指の位置とマッピングすることで背中に触覚を知覚させる方法を提案した。Haptopus [18] は指の触覚情報を吸引機構によって顔に伝達し、指先にデバイスを装着することなく触覚を提示することができる。その他にも、指先の触覚を前腕に提示する手法 [19] が提案されており、触覚デバイスによる手指の制約を行わないために、触覚転移は有効であると考えられる。

2.4 本研究の位置づけ

本研究では、組付けシミュレーション時に手の動きを制限しない方法として手首装着型の触覚デバイスを設計する。しかし、手首装着型デバイスは手首以外に触力覚を与えるのが難しい。特別な手法を用いて直接触覚を提示することは不可能ではないが、かえって手の動作を制限してしまうことに繋がりがかねない。そこで、手指への動作制約を与えない、手首周囲のみのデバイス装着で手に触覚を与える手法として触覚転移技術を適用する。触覚転移は視覚と



図 1: プロトタイプの外観
Fig. 1 Appearance of a prototype.

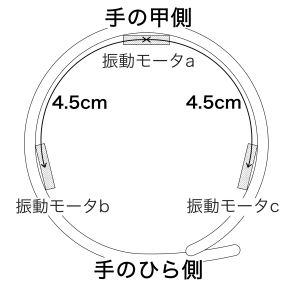


図 2: 振動モータの設置位置
Fig. 2 Position of vibrotactile actuators.

触覚のクロスモーダル現象を用いた手法 [20] と比較して、視覚に頼る必要がないといった利点があり、組付け作業において手がバーチャルオブジェクトに隠れて見えなくなる場合にも利用者に触覚刺激の提示が図れる。

3. デバイス設計

3.1 デバイスの実装方法

図 1 に作成したプロトタイプを示す。リストバンドはナイロン素材のマジックテープを用いて手首に巻きつけることができるようにした。リストバンドの中央部には、振動モータの制御を行うスイッチング回路を実装した基盤を取り付けている。振動モータはリストバンドの内側に取り付け、直接肌に触れるようにした。その他、デバイスの強度を上げるためにセロハンテープとエポキシ樹脂の接着剤によって補強を行った。

3.2 振動モータの配置

本研究では、触覚デバイスの小型化及び軽量化を図るため、小型で軽量の円盤型ブラシレス振動モータ (Silicon Touch Technology inc 製, LBV10B-009) を採用した。プロトタイプでの作動電圧は実測値で 2.16V であった。この時の消費電力は 0.12W である。また、1 個あたりの重量は 1g である。

図 2 に示す通り、振動モータはリストバンドの内周 1 列に 3 つ設置した。設置する振動モータの個数は、前腕の 2 点弁別閾 [21] の観点から、それぞれの振動刺激を区別して認識できる間隔で各振動モータを 1 列に並べたときに、3 つが最大であった。3 つのモータのうちの 1 つは手の甲側に配置する (振動モータ a)。残りの 2 つは、1 つ目の振動モータの中心から前腕の 2 点弁別閾 (4.5cm) [21] の距離を保持する左右位置に設置した (振動モータ b, 振動モータ c)。

3.3 振動パターン

本研究では触れた方向の知覚をバーチャルオブジェクトの形状把握の手がかりにすること及び把持感覚を提示することを目標に、5 つの振動パターンを用意した。振動パター

表 1: 関連研究との比較
 Table 1 Comparison with prior haptic devices.

	提案手法	Tasbi[14]	DextrES[11]	Gravity Grabber[13]	CLAW[7]
刺激提示箇所	手首	手首	親指 人差し指	指先	親指 人差し指
装着方法	手首	手首	外骨格	指先	把持 接触
提示される触覚	接触	接触 把持	把持	把持	把持 テクスチャ
最大消費電力	0.36W	2W 以下	0.12W 以下	-	5W
重量	17g	200g 以下	16g	150g	420g

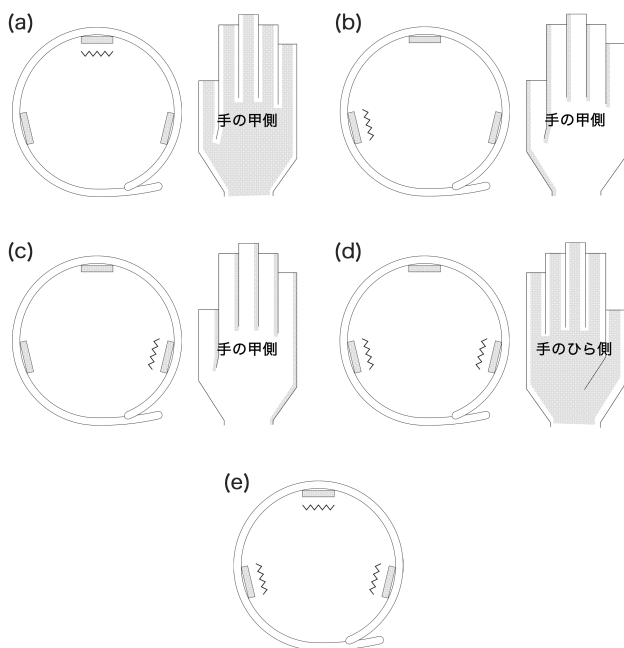


図 3: 各部位に対応する接触 (把持) 時の振動パターンと当たり判定. (a) 手の甲側, (b) 手の左側, (c) 手の右側, (d) 手のひら側, (e) 把持時

Fig. 3 Vibration pattern when contacting/grasping a virtual object. (a)Back of the hand, (b)Left side of the hand, (c)Right side of the hand, (d)Palm side of the hand, (e)Grasp.

の一覧を図 3 に示す. この 5 つの振動パターンはバーチャル環境上のハンドモデルから見たオブジェクトに衝突した方向とハンドモデルでオブジェクトを把持したときの状態に対応させている. 図 3 (a) (b) (c) に示す通り, 手の甲側及び側面に触れた場合は対応した方向の振動モータを動作させる. 図 3 (d) に示すように, 手のひら側に触れた場合は側面の振動モータを同時に動作させる. これはそれぞれの振動モータ単体による振動刺激が手の甲側, 手の左側面, 手の右側面に対応しているため, 複数の振動モータによる組み合わせで情報量を追加する必要があったためである. 図 3 (e) に示すようにバーチャルオブジェクトの

把持時には, すべての振動モータを動作させる. プロトタイプでは振動刺激を提示する時間は 0.5 秒に設定し, 複数箇所にバーチャルオブジェクトが触れた場合は, 対応した振動パターンが同時に提示されるように設定した.

4. デバイス実装の評価

4.1 触覚刺激の違いによる整理

図 3 に示すように, 本研究では手首の周囲に振動刺激を提示している. これは Tasbi[14] と同様であるが, Tasbi[14] は振動刺激に加えて手首への圧力を提示することができる. このことから, プロトタイプは提示できる情報量が従来のデバイスより少ないといった欠点がある. その他, 大きな力覚を提示できるデバイス [8] と比較してプロトタイプはバーチャルオブジェクトと衝突したときの振動刺激による皮膚感覚のみの提示で, バーチャルオブジェクトを押し込んだ時に発生する力覚を提示することができない. しかし, 本研究の手法は扱う振動モータの数が少なく設計が単純であるため, 前述のデバイスより小型にすることが可能である. 将来, 腕の可動域を確保するためにワイヤレス化を行う際, 電源とコンピュータをデバイス本体に組み込もうとするには更に効果的である.

4.2 装着位置

装着面積について, Tasbi[14] は 6 つの振動アクチュエータを用いているのに対して, 本研究では 3 つの振動モータを腕に装着する. 提案手法は手首との装着面積の観点から, 装着感によるストレスを感じづらく, 組付けシミュレーションへの適用性が高いといえる. 加えて, 腕時計のような外観と装着方法で, 現代に馴染みやすいデザインであると考えられる. このことから, 装着方法の観点で外骨格型 [10], [11] や指先装着型 [12], [13] デバイスのようなウェアラブル型と比較すると, 提案手法や Tasbi[14] のような手首装着型デバイスの方が自然であると考えられる. このように, 本研究で提案した触覚デバイスは, 従来の触覚デバイスと比較して装着方法が直感的であり, 装着する

位置も現代の文化からみて馴染みやすく気になりにくいといえる。

4.3 消費電力

作成したプロトタイプは振動モータを 2.16V で動作させている。この振動モータを 3 つ手首の周囲に設置しているので、触覚刺激を提示するために必要な総消費電力は 0.36W である。これは表 1 に示す通り、Tasbi[14] の消費電力と比較しても 4 分の 1 以下であり、他のデバイスと比較しても低い値である。デバイス自体を小さな電力で動作させることは、ワイヤレス化による腕の可動域の確保にあたって有利である。

4.4 重量

作成したプロトタイプは 1g の振動モータを 3 つ設置している。このことから、触覚刺激を提示するために使用する素子の総重量は 3g と非常に軽量である。リストバンドと制御部の重量を加えたデバイスの総重量は 17g である。表 1 に示すように、この重量は Tasbi[14] と比較すると 10 分の 1 以下である。また、その他の触覚デバイスと比較しても非常に軽量である。軽量のデバイスは装着感の観点から有利であり、Tasbi[14] より組付けシミュレーションに合致している。

5. ユーザ評価

5.1 被験者と実験環境

図 4 に実験の様子を示す。本実験には 10 人の学生が参加した。平均年齢は 22.4 歳 ($SD = 1.7$) であった。被験者の中には利き腕が左の被験者 1 名が含まれていたが、全員右手首に触覚デバイスを装着してもらった。また、被験者の手首の平均周囲長は 15.96cm ($SD = 1.7$) であった。被験者には HMD (HTC VIVE Cosmos[3]) を装着してもらった。HMD にはハンドトラッキングを行うために、赤外線センサ (Leap Motion Controller) を取り付けた。Leap Motion Controller は半径 50cm、中心角 110 度の検出範囲でハンドトラッキングが可能である。また、直列に繋いだアルカリ単三電池 4 本が入ったケース及び、Raspberry Pi zero WH (以下、Raspberry Pi) を机の上に固定した。触覚デバイスは右手首に装着し、Raspberry Pi からの制御信号を送信するためにジャンプワイヤを接続する。この時、ジャンプワイヤは半径 80cm の腕の可動域を確保するように机に固定した。

5.2 VR 仕分け

本実験では Unity (2018.1.4f1) によって作成した VR 仕分けを課題とした。VR 仕分け作業を採用した理由は、組付けシミュレーションより課題の難易度が低く、被験者のモチベーションの影響の削減や、より直感的に課題をこな

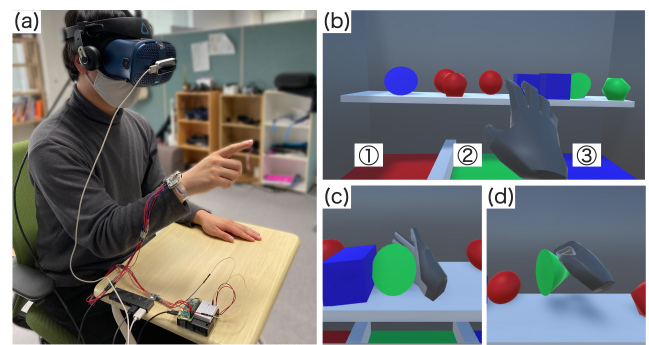


図 4: (a) 実験の様子, (b) HMD に表示される画面, (c) 接触時のハンドモデルの様子, (d) 把持時のハンドモデルの様子

Fig. 4 (a) Scene of the experiment, (b) Screen image displayed on the HMD, (c) Hand model at contact, (d) Hand model at grasp.

してもらふことによって、無意識下でのアンケート結果が得られると考えたためである。被験者が装着する HMD から提示される映像を図 4 (b) に示す。被験者は、目の前に表示されているバーチャルオブジェクトに対して、トラッキングされた手の動きに同期して動作するハンドモデルを用いて「触れる」、「掴む」といった操作を行うことができる。本実験では色の付いたバーチャルオブジェクトを、対応する色の領域 (図 4 (a) の領域①, ②, ③) に置くように指示した。また、プロトタイプによる振動パターンがバーチャルオブジェクトの形状把握に寄与するかを調査するために、赤色の球 2 個と多面体 (20 面体)、青色の立方体 2 個と円錐、緑色の円錐と多面体 (20 面体) を用意した。バーチャルオブジェクトは実験を円滑に行うために、実験実施者がキーボードを押下したタイミングでランダムな位置に生成した。これによって生成されるオブジェクトは土台の上部に出現し、土台の上に落下するように設置される。出現時に前述の落下効果を被験者に見てもらふことで、オブジェクトに物理的な力が働いていることを確認させ、臨場感を演出した。

5.3 ハンドモデルの設定及び操作方法

ハンドモデルの当たり判定は、各指の基節部、中節部、末節部及び手のひら、手の甲に設定した。当たり判定の設定位置は方向検出を行うため、手の甲側の面、側面、手のひら側の 4 方向とし、バーチャルオブジェクトとの接触時に図 3 と対応した ID を Raspberry Pi に送信する。複数のバーチャルオブジェクトが同時に接触した場合は、対応した全ての振動パターンが提示される。また、同時に把持できるバーチャルオブジェクトは 1 つのみである。

図 4 (c) (d) に接触時及び把持時のハンドモデルの様子を示す。把持によるバーチャルオブジェクトの操作は図 4 (d) のように現実で物を把持する状態と大きく異なるが、力覚を提示することのできない本システムではオブジェク

表 2: デバイスの使用感に関するアンケート内容
Table 2 Questionnaire on device usability.

質問番号	質問内容
Q1	どの方向から物体に触れたか分かりましたか?
Q2	デバイスの振動は、物体の形状を把握する手掛かりになりましたか?
Q3	デバイスの振動は、物体に接触したことへの手掛かりになりましたか?
Q4	デバイスの振動は、今回の課題解決において必要ですか?
Q5	振動パターンの違いはわかりましたか?
Q6	デバイスの振動は、物体を把持したことへの手掛かりになりましたか?
Q7	デバイスは装着していて煩わしくありませんでしたか?
Q8	今後 VR を体験する機会があれば、またこのデバイスを使用してみたいと思いますか?

トを掴んだ位置で指を固定できずに、表示されるハンドモデルと手の動作に整合性がとれなくなってしまう。このことから、ハンドモデルに対して身体所有感を認識してもらうため、本システムでは把持時のジェスチャを正確には再現していない。

5.4 実験手順

まず、システムの操作方法及びルールを被験者に説明した後、課題ならびにデバイス着用状態での腕の可動域を確認してもらうために、デバイス未着用状態で1セット（8個のバーチャルオブジェクトを仕分けること）、デバイス着用状態で1セットの練習を行ってもらった。次に、実験に対する慣れの影響を平均化するために、以下の順番で1セットずつ課題を行うように依頼した。

- (1) デバイス未着用状態
- (2) デバイス着用状態
- (3) デバイス着用状態
- (4) デバイス未着用状態

5.5 アンケート内容

アンケートには以下に示す2つの内容を含んでいる。

- デバイス着用状態と未着用状態との比較
- デバイスの使用感（表 2）

デバイス着用状態と未着用状態の比較は、臨場感、接触感、把持感、ストレスの4つの指標で行った。また、デバイスの使用感を評価するために、本研究で提案した振動パターンが課題に対して与えた影響及び、作成したプロトタイプを装着する煩わしさとモチベーションを質問項目に加えた。アンケートはすべて5段階のリッカート尺度で作成し、質問内容に対して肯定度が低い順番に1から5までのスコアを付けた。

5.6 実験時における被験者への影響

本実験では、システムの影響によって被験者全員が同じ個数のバーチャルオブジェクトを仕分けることができていない。1つ目の理由は、バーチャルオブジェクトに働く

物理演算によって土台の上うまく配置できず、仕分け対象の領域に落下してしまうことがあったからである。これは、バーチャルオブジェクトを土台の上に落下するように配置したことに起因する。2つ目の理由は、意図せずハンドモデルがバーチャルオブジェクトに触れてしまう場合があり、そのまま仕分け対象の領域に落下してしまうことがあったからである。これらの理由によって、被験者が8個のバーチャルオブジェクトを仕分けることができない場面があった。

その他の影響として、使用機器の性能によるものがある。

Leap Motion Controller の検出精度の不足によって、被験者がバーチャルオブジェクトをハンドモデルによって把持することができない場面があった。自由記述でも、「握って持ち上げてからすぐ落ちる場合と、安定して握り続けられる場合があり気になった。」といった意見があり、実験に影響を与えてしまった可能性が考えられる。

5.7 デバイス着用に係る評価

図 5 にデバイス着用状態と未着用状態でのスコアの平均値を示す。Wilcoxon の符号順位検定によって各項目で両側検定を行った結果、接触感のスコアについて有意水準 $p < .01$ で有意差が見られた ($p = .00781$) が、その他のスコアに有意差は見られなかった。また、デバイス着用状態及びデバイス未着用状態で感じたストレスについて自由に記述してもらった。デバイス着用状態の場合、「オブジェクトを掴んで動かしていることが感じられ、作業しやすかった。」といった臨場感に関する肯定的な意見と「デバイスが軽かったので、付けていない状態とそう変わらなかった。」といったデバイスの装着感に関する肯定的な意見が得られた。一方、「デバイスを着けた腕が自由に動かせなかったから。」といった可動域に関する否定的な意見が得られた。デバイス未着用状態の場合、デバイスを手首に装着していないことへの肯定的な意見は得られなかったが、「特に違和感はなかった。」といった中立な意見が得られた。一方、「オブジェクトに触れてるかどうか分かりづらく、オブジェクトを動かしにくかった。」「掴めたかわからない。」とい

た臨場感に関する否定的な意見が得られた。

5.8 デバイスによる振動の評価

図 6 にデバイスの振動が被験者に提示した擬似触覚について質問した結果を示す。縦軸はアンケートスコアの平均値であり、横軸はアンケートの質問項目である。

Q4 についての回答選択理由を自由に記述してもらった結果、肯定的に答えていた被験者からは「振動があることで VR の臨場感及び、作業のしやすさが向上したと感じる。」「振動無しだとほんとに触れたかどうか分かりづらいところがあった。」といった意見が得られた。一方、Q4 で否定的に答えていた被験者からは「振動があるとよりスムーズになるが、振動がなくても作業自体は解決可能であった。」「画面上では指先で物体に触れているが振動は手首で感じられたので物体と振動に一体感がなかった。」といった意見が得られた。

5.9 デバイスの使用感の評価

デバイス着用に関する煩わしさ (Q7) ならびにデバイスを利用することへのモチベーション (Q8) についての回答結果を図 6 に示す。縦軸はスコアの平均値であり、横軸はアンケートの質問項目である。Q7 についての回答選択理由を自由に記述してもらった結果、肯定的に回答した被験者からは「軽かったのとコードも感じられなかったので、煩わしさはなかった。」「手に巻いてる程度だとそこまで邪魔ではなかった。」といった意見が得られた。一方、否定的に回答した被験者からは「物体と振動に一体感がなく振動が課題をやる上で重要な情報にならなかったから。」「自由に腕を動かせなかったから。」といった意見が得られた。Q8 についての回答選択理由を自由に記述してもらった結果、肯定的に回答した被験者からは「VR 体験において臨場感は重要であると考え、振動によってオブジェクトに触れていると感じることができ、臨場感の向上に寄与したと感じる。」といった意見が得られた。一方、否定的に回答した被験者からは「デバイス自体はあってもなくてもあまり変わらないと思ったから。」といった意見が得られた。

5.10 その他の意見について

最後に、本実験に関する意見及び改善点に関する質問を自由記述で行った。まず、「振動によってどんな情報を示しているのかわからなかったので振動の意味がわかるようにすべきだと思った。」といった意見のように、触覚デバイスから提示した振動パターンについての否定的な意見が複数得られた。また、デバイスの可動域の改善に関する意見も得られた。肯定的な意見として、「仕分け作業はとても楽しく出来たので良い実験方法だと思った。」といった VR 仕分けシステムを用いた実験についてのモチベーションに関する記述があった。

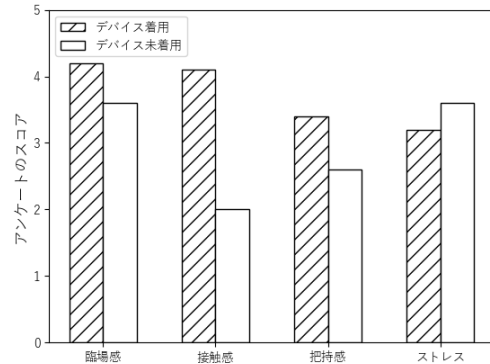


図 5: デバイス着用状態と未着用状態のアンケート結果
Fig. 5 Questionnaire results when wearing and not wearing the devices.

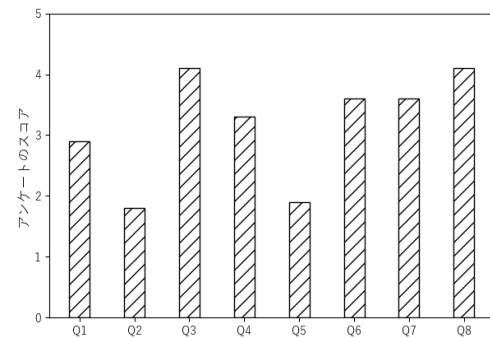


図 6: デバイスの使用感に関するアンケート結果
Fig. 6 Questionnaire results for device usability.

6. 考察

6.1 触覚デバイスに係る考察と今後の課題

本研究で作成した触覚デバイスは非常に軽量となっている。手首装着型で、手指の動作を制限することなく触覚を提示することができるため、従来のデバイスに比べて組付けシミュレーションに合致している。また、本プロトタイプでは電源供給と振動モータを制御するためのコンピュータを有線接続する必要があったが、低消費電力で動作するため、将来的にはワイヤレス化によって腕の可動域を制限しないことが期待できる。しかし、従来のデバイスと比較して提示できる触覚刺激が少ないため、表現できる情報量が少ないといった欠点がある。特に力覚を提示することができないことは、バーチャルオブジェクトの形状把握に影響を与えてしまうので改善が必要である。

6.2 実験結果の考察と今後の課題

デバイス着用状態とデバイス未着用状態との比較では、接触感について統計的有意差が見られた。また、臨場感と把持感についてもデバイス着用状態のほうが肯定的な意見

が多く見られた。その結果、本研究で作成した触覚デバイスによる接触感の提示効果が認められた。しかし、臨場感と把持感に統計的有意差はなく、提案したデバイスの振動パターンが把持感及び臨場感の向上に寄与していたかは不明である。

振動パターンについては、Q5の質問で否定的な回答が多かったため、擬似触覚提示にはほとんど寄与していなかったと考えられる。また、アンケートの自由記述にも「振動に種類があるような気はしたが、結局分からずにいた。」といったような意見が得られた。デバイスの振動パターンは無意識下で区別できるほどの刺激ではなかったといえる。以上より、振動以外の触覚刺激の導入を検討する必要がある。

本実験では振動パターンについて否定的な意見が多く得られたが、デバイスの振動刺激による接触感に関する肯定的な意見も多く得られた。このことから、被験者は振動パターンによって接触感を認識していたのではなく、振動刺激の有無によって接触感を認識していた可能性が考えられる。振動刺激の有無によって接触感を認識できるのであれば、本研究では3つの振動モータを使用したところを、1つに減らすことができる可能性が考えられる。使用モータ数の削減による、軽量化及びワイヤレス化を図ることで、装着感に煩わしさを感じないデバイス設計が可能である。

デバイスの装着感について、Q7の質問で肯定的な意見が多く得られたため、提案した触覚デバイスを身に着けることにそれほど抵抗感を感じられなかったといえる。また、Q7に加えQ8の質問においても肯定的な意見が多く見られたことから、手首装着型のデバイスはユーザにとって広く受け入れられやすい可能性が示唆された。一方で、外部電源とRaspberry Piをデバイスに繋ぐジャンプワイヤが腕の可動域を狭めていることに起因する煩わしさを感じた被験者もいたことから、ワイヤレスを想定したデバイス設計を行う必要がある。

7. おわりに

本研究では、組付けシミュレーションに向けて、接触感を提示することができる、装着に煩わしさの少ない触覚デバイスを提案した。デバイスの設計方針として、手の動きを制限しないように手首に装着する形状と、触覚転移によって接触感と把持感を提示する手法を採用した。そして、手首の周囲に設置した3つの振動モータからの触覚刺激によって接触感と把持感を提示する手法及び振動パターンによって方向情報を提示する手法を検討した。

次に、作成した触覚デバイスが組付けシミュレーション時に有効であるか評価実験を行った。その結果、従来のデバイスと比べて、消費電力及び重量の観点で優れていることが分かった。しかし、力覚を提示することができないといった欠点があり、ユーザ評価から、それがバーチャルオ

ブジェクトの形状把握ができないことの原因である可能性が示唆された。また、提示した振動パターンが伝えたい刺激には必ずしも結びついていないといった点が確認され、更なる研究が必要である。デバイス装着の煩わしさについては、ユーザ評価で肯定的な意見が多く得られ、組付けシミュレーションにおいて重要な接触感を提示しながら、デバイスを装着することへのストレスを削減する目標を達成することができた。

本実験では、実際の組付けシミュレーション環境での提案デバイスの有効性についての検証は行っておらず、今後の課題として残されている。

参考文献

- [1] 厚生労働省, 労働災害(死亡・休業4日以上) データベース. <https://www.oculus.com/quest-2/>. Accessed: 2021-1-20.
- [2] Facebook Inc Oculus Quest2. <https://www.oculus.com/quest-2/>. Accessed: 2021-1-20.
- [3] HTC Corporation VIVE Cosmos. <https://www.vive.com/jp/product/vive-cosmos/overview/>. Accessed: 2021-1-20.
- [4] Berni Aurora and Borgianni Yuri. Applications of virtual reality in engineering and product design: Why, what, how, when and where. *Electronics*, Vol. 9, p. 1064, 06 2020.
- [5] Camburn Bradley, Viswanathan Vimal, Linsey Julie, Anderson David, Jensen Daniel, Crawford Richard, Otto Kevin, and Wood Kristin. Design prototyping methods: State of the art in strategies, techniques, and guidelines. *Design Science*, Vol. 3, , 01 2017.
- [6] Brooks Jr Frederick. What's real about virtual reality? *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 19, pp. 16–27, 12 1999.
- [7] Inrak Choi, Eyal Ofek, Hrvoje Benko, Mike Sinclair, and Christian Holz. CLAW: A multifunctional handheld haptic controller for grasping, touching, and triggering in virtual reality. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–13, 2018.
- [8] Cathy Fang, Yang Zhang, Matthew Dworman, and Chris Harrison. Wireality: Enabling complex tangible geometries in virtual reality with worn multi-string haptics. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing*, pp. 1–10, 2020.
- [9] Shigeo Yoshida, Yuqian Sun, , and Hideaki Kuzuoka. PoCoPo: Handheld pin-based shape display for haptic rendering in virtual reality. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '20)*, pp. 1–13, 2020.
- [10] Gu Xiaochi, Zhang Yifei, Sun Weize, Bian Yuanzhe, Zhou Dao, and Kiristensson Per. Dexmo: An inexpensive and lightweight mechanical exoskeleton for motion capture and force feedback in VR. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '16)*, pp. 1991–1995, 2016.
- [11] Ronan Hinchet, Velko Vechev, Shea Herbert, and Hilliges Otmar. DextrES: Wearable haptic feedback for grasping in VR via a thin form-factor electrostatic brake. In *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '18)*, pp. 901–912, 2018.

- [12] Inrak Choi, Elliot W Hawkes, David L Christensen, Christopher J Ploch, and Sean Follmer. Wolverine: A wearable haptic interface for grasping in virtual reality. In *Proceedings of the 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 986–993, 2016.
- [13] Kouta Minamizawa, Souichiro Fukamachi, Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, and Susumu Tachi. Gravity Grabber: wearable haptic display to present virtual mass sensation. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2007 Emerging Technologies (SIGGRAPH '07)*, p. 8, 2007.
- [14] Evan Pezent, Majed Samad, Shea Robinson, Priyanshu Agarwal, Hrvoje Benko, and Nick Colonnese. Tasbi: Multisensory squeeze and vibrotactile wrist haptics for augmented and virtual reality. In *Proceedings of the 2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 1–6, 2019.
- [15] Kovacs Robert, Ofek Eyal, Gonzalez Franco Mar, Siu Alexa Fay, Marwecki Sebastian, Holz Christian, and Sinclair Mike. HapticPIVOT: On-demand handhelds in VR. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '20)*, p. 1046–1059, 2020.
- [16] Thomas H Massie and J Kenneth Salisbury. The PHAN-ToM haptic interface: A device for probing virtual objects. In *Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 295–301, 1994.
- [17] 森山多覇, 高橋哲史, 梶本裕之. 指先の触覚を背中に転移する高解像度触覚ベストの開発. 第24回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2019.
- [18] Takayuki Kameoka, Yuki Kon, Takuto Nakamura, and Hiroyuki Kajimoto. Haptopus: Transferring the touch sense of the hand to the face using suction mechanism embedded in hmd. In *Proceedings of the Symposium on Spatial User Interaction (SUI '18)*, pp. 11–15, 2018.
- [19] Taha Moriyama, Takuto Nakamura, and Hiroyuki Kajimoto. Development of a wearable haptic device that presents the haptic sensation corresponding to three fingers on the forearm. In *Proceedings of the Symposium on Spatial User Interaction (SUI '18)*, pp. 158–162, 2018.
- [20] Lécuyer Anatole, Coquillart Sabine, Rocquencourt Inria, Kheddar Abderrahmane, and Richard Paul. Pseudo-haptic feedback: Can isometric input devices simulate force feedback? In *Proceedings of the IEEE VR*, pp. 83–90, 2000.
- [21] Sidney Weinstein. Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex, and laterality. In (Kenshalo D.R. ed.) and Charles C Thomas, editors, *The Skin Senses*, pp. 195–222, 1968.