Vol.2024-HCI-210 No.12
Vol.2024-UBI-84 No.12
2024/11/18

VR 空間でのスケッチングにおける力覚提示が操作性と精度に与える影響の分析

高永侑輝 [1] 林佑一 [1] 中村文彦 [1] 片岡佑太 [2] 森尚平 [3] 柴田史久 [1] 木村朝子 [1]

概要：本研究では，VR 空間におけるスケッチングの課題に着目し，力覚提示がもたらす効果を分析した．VR 空間でのスケッチングは，環境情報が実空間ほど豊富でないため深度や距離感の把握が困難であり，実空間に比べて操作が難しいことが知られている．この課題に対し，伸縮するペン型デバイスを用いて実験を行った．実験では，力覚提示がスケッチングの書きやすさに与える影響を調査した．力覚提示なしの場合と比較し，ライントレースの正確性，ユーザの疲労度，所要時間について，SUS，NASA-TLX 等の指標を用いて評価を行った．実験結果から，VR 空間における力覚提示スケッチングの有効性について考察を行った．

キーワード：力覚提示デバイス，人工現実感，力覚提示，スケッチング

1. はじめに

廉価で高性能な HMD (Head Mounted Display) の普及により, VR (Virtual Reality; 人工現実感) 体験は身近なものになりつつある．VR 体験においてシステムへの入力には様々な手法が存在し，コントローラのボタンを使用するものや VR 空間で仮想のキーボードを使用するものなどが広く使われている[1]．その中でも線を書く動作（スケッチング）は図形や文字といった情報の入力手段として重要であり，ボタンやキーボードに比べてより複雑な情報の入力が可能である．こうした特徴を生かしてスケッチングはデザインやモデリングを行う VR アプリケーションなどの操作に使用されている．

VR 空間にてスケッチングを用いる例として，Gravity Sketch [2] を利用した 3D モデルの作成が挙げられる．Gravity Sketch では VR 空間で空中に線を描いたりオブジェクトを配置することで 3D モデルを作成することができるアプリケーションである．従来のディスプレイ上で 3D モデルを編集する場合は 3 次元空間を 2 次元平面上で扱う必要があり，操作や視点の移動に慣れる必要があったが，VR 空間で 3D モデルを編集することでより直観的な操作が可能となった．

また，仮想物体とのインタラクションにおいて触覚情報を提示することで，臨場感の向上を図る取り組みが活発に行われている. HMD による頭部姿勢に応じた VR 空間の映像の提示だけでなく，VR 環境とのインタラクションに触覚情報を提示することで，ユーザはより高い臨場感が得られる. 例えば, VR コントローラの多くには振動機能が搭載されており，VR 空間で物体に触れた際などにコントローラを振動させることで, 触覚情報をユーザに提示している．また，振動以外にも様々な触覚情報を提示する研究が行われており，Grabity [3] は把持動作に焦点を当て，指の動作を制限するブレーキ機構を用いて，指で物を把持する感覚を提示できる．著者の研究グループでも触覚提示を行うデバイスを開発しており，ペン型デバイスの先端を伸縮し，机などの実世界の物体と接触させ，実物体からの反力を得ることで，仮想物体に触れたように感じさせる先端伸縮型デバイス Extick Touch [4] [5] の開発を行った（図 1）. Extick Touch は実物体との反力を用いて力覚提示を行うため，比較的大きな力を提示でき，また，手で把持して使用するため，接地型デバイスのように設置場所に固定されず，使用者の動きに合わせて比較的広い範囲で使用できる特徴を持つ．しかし，本デバイスの力覚提示機能が VR 空間でのスケッチングにおける精度向上や操作性の改善にどのような効果をもたらすかについては，十分に検証されていない．

そこで本研究では，VR 空間でスケッチングを行う際にユーザに力覚を提示することでどのような効果があるのか分析する．力覚提示に Extick Touch を使用し，スケッチング時の力覚フィードバックの有無が，主観的な作業負荷やユーザビリティ，客観的なトレース精度やタスク完了時間に与える影響を評価する．

2. 関連研究

力覚提示デバイスは，ユーザに触覚情報を提示するための研究が様々行われており，デバイスの特徴から 2 種類に大別することができる．1 つは実空間に固定するものであり，もう 1 つは実空間に固定しないものである．本論文では前者を接地型デバイス，後者を非接地型デバイスと定義し，本章ではそれぞれがどのように触覚を提示しているのかについて述べる．その後，接地型，非接地型デバイス両方の特徴を有するスライタスデバイスについて述べ，最後に私たちの研究グループで開発している力覚提示デバイス Extick Touch について述べる．

1 立命館大学大学院 情報理工学研究科
2 立命館大学 OIC 総合研究機構
3 シュトゥットガルト大学

ⓒ2024 Information Processing Society of Japan

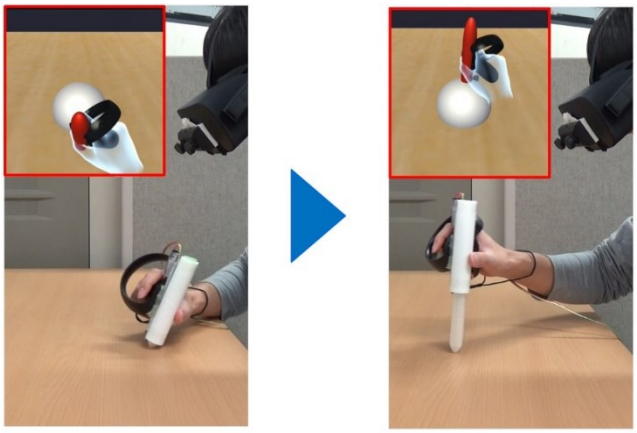


図 1：Extick Touch のイメージ [5]

2.1 VR 空間でのスケッチング

Arora ら [6] は物理的な面の有無や視覚的な補助が，スケッチング時の精度やパフォーマンスにどのような影響を与える要因を分析した．彼らの研究では，物理的な面がないことがスケッチの精度を低下させることを示した．Fourrier ら [7] は VR 空間内に表示された仮想の平面に手書きで文字を書くことで文字入力を行うシステムを用いて，様々な条件で入力速度や入力精度を調査した．その結果，システムがペンと平面の接触時に視覚的または振動フィードバックをユーザに提示することで，ユーザがペンと平面の接触を認識しやすくなり，フィードバックがない条件より入力速度が向上したと考察している．また，平面が傾斜していることで，垂直な面に比べて身体的な要求が大幅に軽減されることも確認した．

これらの研究では実物体を用いた力覚提示や振動を用いたフィードバックがスケッチングに与える影響についての分析が行われた．その結果，ユーザが線を書いていることを認識することを補助する情報を提示することで，スケッチング時の精度が改善されることが示唆された．

2.2 接地型デバイス

接地型デバイスは，その用途に応じて様々なデバイスが提案されている．その中の 1 つに PHANToM [8] がある．PHANToM とは，デバイスに装着されたペン型のインタフェース部を通してユーザに力覚を提示するデバイスである．インタフェース部はリンク機構を通してモータで駆動されており，ユーザに詳細な力覚提示を行うことが可能である．PHANToM を用いて力覚を提示する研究が様々行われている．Foskey らの ArtNova [9] では，仮想物体に対して描画，変形といった操作を行う際に PHANToM を用いて触覚を提示した．

PHANToM などの大型のデバイスは，大きさや重量の制限が少なく，より現実に近い触覚提示を行うことができる特徴がある．その一方で実世界に固定されてしまうため，固定した位置の付近でしか力覚を提示することができない．

2.3 非接地型デバイス

非接地型デバイスでは，接地型デバイスよりもさらに広い範囲で触覚情報を提示することが可能である．例えば，Kamuro ら [10] はデバイスの把持部を伸縮，変形させることで指先に力覚を提示するデバイスを開発した．このデバイスは仮想物体をつつく，なぞるといった動作を行った際に力覚を提示することで，仮想物体への接触感を表現することができる．力覚の提示は指先にとどまるため，実空間で物体に触れたときの感覚とは異なるが，視覚刺激と組み合わせて提示することで実際に物体に触れているかのような感覚を感じることができる．

非接地型デバイスは接地型デバイスに比べて，外界との接点を持たないため機構や手法に制約が多い．そのため再現したい触覚情報そのものを提示することが困難である場合が多い．そこで人間の知覚は視覚情報に影響を受けやすく，視覚と触覚の間に矛盾が生じた際には，視覚によって触知覚が変化する特性 [11] を利用し，限られた条件の中で触覚情報を提示することに成功している．

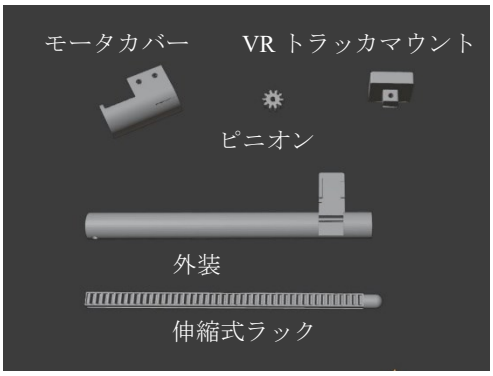
2.4 ペン型デバイス

2.2 節や 2.3 節で述べたように，接地型デバイスと非接地型デバイスにはそれぞれ長所が存在する．接地型デバイスでは比較的大きな力を詳細に提示できる一方で，非接地型デバイスは広範な範囲で使用することができる特徴がある．これらの特徴を組み合わせたものとしてペン型デバイスがある．impAct [12] はタブレットをペン型のデバイスで操作する際にデバイスの長さを伸縮させることで，画面内の物体との接触感を提示している．タブレットのタッチパネルからデバイスの位置を，デバイスに搭載されたセンサからデバイスの角度を取得することで，デバイスの位置と姿勢に合わせてペンを画面に描画し，画面内の物体と接触した際に力覚を提示している．また，Haptylus [13] は伸縮可能な機構を備えたペン型デバイスであり，デバイスの伸縮に応じて CG のペンの長さが変化することで，VR における 3 次元空間でのバーチャル物体とのインタラクションを実現している．また，Extick Touch [5] は VR 空間での仮想物体との接触を表現することのできるデバイスである．デバイスの位置と姿勢をセンシングするトラッカを装着することで，付近に実物体さえあれば任意の位置で使用することが可能であり，HMD による視覚情報の提示とペン型デバイス（Extick Touch）から得られる触覚によって実現されるバーチャル物体との相互作用が，臨場感の向上をもたらしている．

これらのデバイスは非接地型デバイスでありながら，実物体との接触による反力を利用して力覚提示を行っているため，接地型デバイスのような力覚を提示することが可能である．また，実物体との接点は固定されていないため，使用する範囲に制約がないという非接地型デバイスの特徴

ⓒ2024 Information Processing Society of Japan

(a) : Extick Touch



(b) : Extick Touch の構成

図 2: Extick Touch のモデル

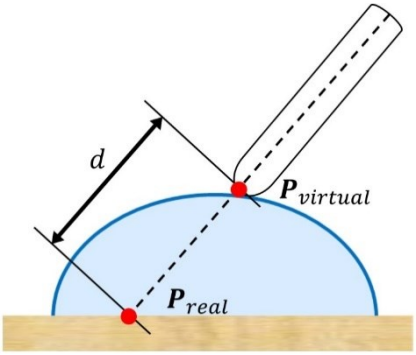


図 3: 伸縮距離のイメージ

も合わせ持つ．しかし，先行研究では Extick Touch を用いた VR 空間でのスケッチングにおける精度向上や操作性の改善について十分に検証されていない．

3. Extick Touch の構成

3.1 力覚提示手法

本デバイスでは，ユーザの動作範囲をできるだけ制限せずに力覚を提示するために，デバイスと机や壁などの実物体が接触した際に生じる反力を用いる．そのため，実世界に机のような実物体が配置されていることを前提とする．デバイスと実物体を任意のタイミングで接触させるために，デバイス本体の長さを変化させるラックアンドピニオン機構を用いている．本研究では，この接触感の有無が VR 空間でのスケッチングの精度，ユーザビリティ，およびユーザの疲労度に与える影響を調べる．

3.2 スケッチングのシステム構成

Extick Touch は VR 空間の管理とデバイス制御を行う PC，ユーザに VR 空間の映像提示を行う HMD，デバイスのモータを制御するマイクロコンピュータ (Arduino Uno Rev3，Arduino LCC) ，デバイスの位置を計測するトラッカ，およびデバイス本体の構成でスケッチングを行う．VR 空間の映像提示とデバイス制御を毎秒 120 フレームで行った．HMD には HTC VIVE Pro2 を用いた． VIVE Pro2 はベースステーションを用いて HMD や専用トラッカの位置や姿勢を計測することで，VR 空間と実空間でユーザやトラッカの動きを同期することが可能である．デバイスには専用トラッカである VIVE Tracker 3.0 が装着されており，デバイスの位置と姿勢を計測している．デバイスの制御は Arduino Uno（Arduino LCC 製）と Motor Shield Rev3（Arduino LCC 製）を用いており，256 段階で指定した電圧を Pulse Width Modulation (PWM) 信号にてモータに出力する．

3.3 デバイス構成

デバイスを（図 2 (a) ）に示す．デバイス自体の長さを変えることで実物体との接触による力覚提示を行う．そのためにデバイスをユーザが把持する外装，伸縮部とそれを駆動するギアドモータから構成されている（図 2 (b) ）．VIVE Tracker3.0 を含まないデバイスの全長は 165mm であり，最大で 120mm の伸縮が可能である．外装の直径は 14mm である．伸縮部は外装の内側に配置されており，共に PLA 樹脂製である．この伸縮部を外装に取り付けたギアドモータによって伸縮させる．ギアドモータはギア比 54.45:1 の Polulu 社製シャフト付き超小型メタルギアドモータ HPCB12V (Pololu-3050) を使用しており，定格 12V でストール時トルクが 0.67kg·cm である．これにラックアンドピニオンを装着することで伸縮を行う．モータには Pololu 社のエンコーダ (Pololu-3081) が装着され，モータの回転をセンシングしている．エンコーダはモータ 1 回転につき 12 段階の分解能を持ち，これを伸縮部の移動距離に換算すると 1 段階につき 0.05mm となる．また，デバイスの後端部には 3.2 節で述べた VIVE Tracker 3.0 が装着されており，実空間内での位置と姿勢を取得している．VIVE Tracker 3.0 を含めたデバイスの重量は 120g である．

3.4 伸縮処理

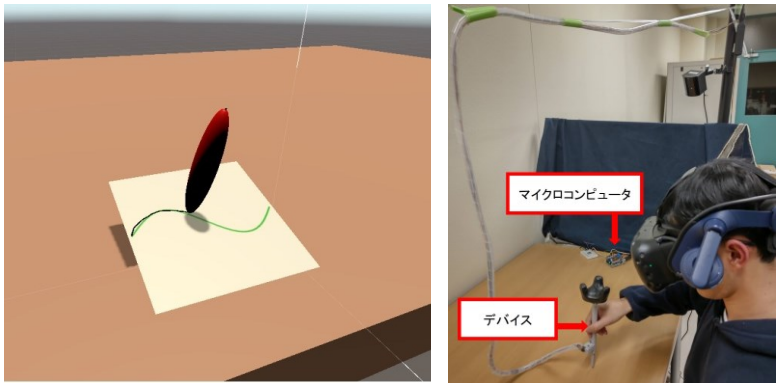
3.4.1 処理の流れ

適切なタイミングで力覚を提示するために，デバイスと仮想物体が接触すると同時に，デバイス先端が実物体と接触するようにデバイスを伸縮させる必要がある．そのために，デバイスの伸縮方向への方向ベクトルと仮想物体との交点と床面との交点を求める．ここで床面は実空間と VR 空間で同じ位置に物体が配置されていると仮定する．この 2 つの交点間の距離を求め，デバイスが伸縮可能な長さ以内であれば伸縮を行う．この処理を繰り返すことで，デバイス先端が仮想物体と接触すると同時に床面に接触し，ユーザに力覚を提示することができる．

3.4.2 デバイスと仮想物体の衝突

Extick Touch の伸縮方向への方向ベクトルvと仮想物体との交点$P_{virtual}$を求める．次に実空間に配置されている床面と同じ位置に配置されている VR 空間での床面との交点P_{real}を求める．この時，vと床面が交点を持たない場合，デバイスを伸縮させても床面との接触は不可能であると判定し，以降の伸縮処理は行わない．

ⓒ2024 Information Processing Society of Japan



(a) VR 空間のイメージ　　(b) 実験参加者の様子

図 4:　実験の様子

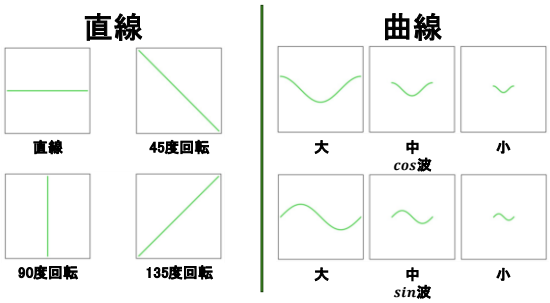


図 5:　ターゲットの形状

3.4.3 伸縮距離の算出

デバイス先端が現実世界での床面に接触するように，先ほど得た仮想物体との接触点$P_{virtual}$と床面との接触点P_{real}からデバイスを伸縮させる長さdを式で求める（図 3）

$$d = |P_{virtual} - P_{real}|$$

ここで求めたdの分だけデバイスを伸縮させるために，モータへの信号l_{sign}を以下の式で求める

$$l_{sign} = d \times r_{motor} \times e \,/\, (p_l \times g_p)$$

ここで，r_{motor}はモータの減速比である 50，eはエンコーダの分解能である 12，p_lはラックのピッチ (mm) である 3.1，g_pはピニオンの歯数である 10 とした．

4.　実験

4.1　目的

VR 空間においてスケッチングを行う際，ユーザが線を書いている時に振動や視覚刺激を提示することで描画の精度や操作性が向上することが知られている [6] [7]．そこで本研究では力覚情報の提示に着目し，Extick Touch を用いて力覚提示の有無ごとに座位にて机の付近でスケッチングを行う実験を実施する．視覚情報のみでスケッチングを行う場合と比較し，力覚提示を行う場合にどのような変化が起こるのかを分析する．

4.2　内容

VR 空間において，実験参加者の正面にキャンバス（平面の板）を表示し，その上に表示されるターゲットをなぞって線を書かせるタスクを行った （図 4）．実験を行う座位・机の付近の環境で想定されるスケッチング状況について分析を行うために，キャンバスやターゲットの表示については次のように決定した．

- キャンバスは複数の位置に出現する
- キャンバスは複数の角度である
- 複数のターゲットの形状が出現する

4.3　条件

本実験では 4.2 節で述べたように座位・机の付近でのスケッチング状況を想定する．キャンバスの位置は特定の位置に固定されることはなく，手の届く範囲内であれば複数の場所にキャンバスが表示される状況が想定される．手の届く範囲は実験参加者を中心とした扇形となるが，正面以外にキャンバスが表示された場合はキャンバスが正面になるように体の向きを変えてタスクを行うと考えられる．そのため，実験参加者の正面以外の領域については実験条件から外した．したがって，本実験では実験参加者の手の届く範囲をキャリブレーションし，範囲内かつ実験参加者の正面のランダムな位置にキャンバスを表示した．キャンバスの角度については，参加者の左右方向を軸にキャンバスを回転させ，参加者の方向に傾いた条件を複数設定した．机の天板と並行な状態を 0 度とし，参加者に対して手前に傾く方向を正として 0 度，15 度，30 度の 3 種類からランダムにキャンバスが提示される．ターゲットの形状は，スケッチングで想定される線の種類は直線と曲線の 2 種類に分けられると考え，直線を 45 度ずつ回転させたもの 4 種類と，曲線として，cos 波と sin 波を大中小の 3 種類として設定した．これらの計 10 通りのターゲット形状からランダムに選択した（図 5）．キャンバスの大きさは 20cm×20cm であった．参加者は椅子に座り，正面に机がある環境で実験を行った．机は横 160cm，奥行き 80cm，高さ 70cm であった．

VR 空間で実世界と同様の机を表示し，参加者はこの机上で実験を行った．この机に Extick Touch を接触させ，力覚提示を行った．実験には実験の説明を十分に受けた上で実験の参加に同意した計 24 名（21 歳～24 歳の男性 21 名，女性 3 名）が参加した．実験参加者の人数は G*Power [14] を用いて決定した．Cohen による中程度の効果量 (0.5) を仮定し，有意水準 5%，検定力 80%を満たすために必要な人数 (N=24) を決定した．

4.4　手順

実験は以下の手順で実施し，実験時間は約 40 分であった．

(1)　実験の説明と教示を行う
(2)　力覚提示の有無をカウンターバランスを考慮して

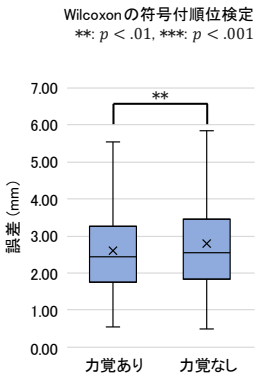


図 6: 誤差の結果

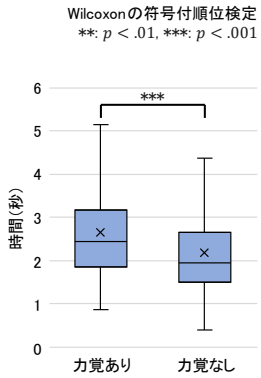


図 7: 作業時間の結果

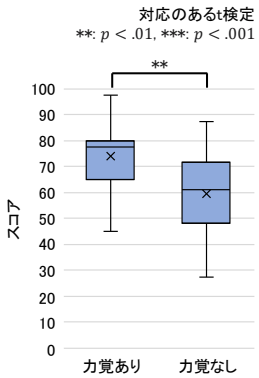


図 8: SUS の結果

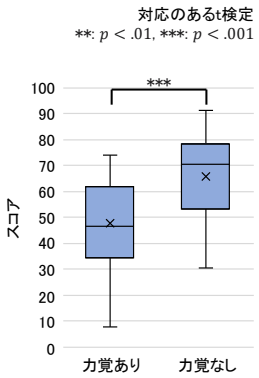


図 9: NASA-TLX の結果

決定する

(3) キャリブレーションを実施する
(4) 練習用のタスクを 5 分間行わせる
(5) 実験用のタスクを 80 回行わせる
（形状 10 種類・手の届く範囲内の位置・角度 3 種類からそれぞれランダムに決定したものを 80 回）
(6) HMD を外させ PC 画面上で SUS，NASA-TLX に回答させる
(7) コメントを聴取する
(8) 5 分間休憩させる
(9) (2)～(8)を追加で 2 回行う
（合計で力覚提示あり 2 回，力覚提示なし 1 回）

実験においては各参加者間でデバイスの使用状況が変わらないように以下の説明と教示を行った．

- デバイスはペンのように握って使用する
- デバイスは机に対して垂直に立てて使用する
- 肘を机に付けずに使用する

予備実験においてデバイスを斜めに持つと伸縮した際にデバイスと机の接点が滑り，意図せずデバイスが水平方向に移動してしまう状況が確認されたため，これを防ぐために机に対して垂直を保つように持たせた．デバイスが机に対して垂直であれば，伸縮によりデバイスの把持部分が移動しても水平方向への移動は発生せず，デバイスの持ち方を垂直に保つことで予備実験で生じた問題が発生しないことを確認した．またキャリブレーションでは，実空間の机と VR 空間の机の位置合わせも行った．

4.5 結果

本実験では，ターゲットとの誤差，主観的な使いやすさ，主観的な作業負荷，作業時間を計測した．主観的な使いやすさは，System Usability Scale [15] (SUS) を用いて評価した．SUS とは主観的にユーザビリティを評価する手法として広く用いられている評価である．主観的な作業負荷は，NASA Task Load Index [16] (NASA-TLX) を用いて評価した．作業時間では，各タスクにおけるキャンバスに触れてから離れるまでの作業時間を計測した．実験中に VIVE Tracker 3.0 の影響で正常なデータが取得できなかった 5 試行は除外して結果の分析を行った．

ターゲットとの誤差は，実験タスクで描画した線を 2mm 間隔でサンプリングし，サンプリング点ごとのターゲットまでの最短距離とした．ターゲットとの誤差の結果を図 6 に示す．正規性の検定を Shapiro-Wilk 検定にて行った結果，力覚あり条件 ($p < .001$)，力覚なし条件 ($p < .001$) 共に正規性の仮定が棄却された．そこで Wilcoxon の符号付順位検定を行った結果，力覚なし条件が力覚あり条件よりも有意に誤差が小さくなった ($p = .004$, $r = .37$)．

作業時間の結果を図 7 に示す．ここでは VR 空間においてデバイスがキャンバスと接触してから離れるまでを作業時間としている．力覚あり条件，力覚なし条件それぞれについて正規性の検定を Shapiro-Wilk 検定にて行った．検定から，力覚あり条件の結果は正規性が棄却された ($p < .001$) .そのため，Wilcoxon の符号付順位検定を行った結果，力覚あり条件が力覚なし条件より有意に作業時間が長くなった ($p < .001$)．

SUS の結果を図 8 に示す．力覚あり条件，力覚なし条件それぞれについて正規性の検定を Shapiro-Wilk 検定にて行った．その結果，力覚あり条件 ($p = .260$)，力覚なし条件 ($p = .968$) 共に正規性の仮定が棄却されなかったため，対応のある t 検定を行った．検定の結果，力覚あり条件が力覚なし条件よりも優位にスコアが高くなった ($p = .003$)．

NASA-TLX の結果を図 9 に示す．力覚あり条件，力覚なし条件それぞれにおける NASA-TLX について正規性の検定を Shapiro-Wilk 検定にて行った．その結果，力覚あり条件 ($p = .068$)，力覚なし条件 ($p = .31$) 共に正規性の仮定が棄却されなかったため，対応のある t 検定を行った．検定の結果，力覚あり条件での NASA-TLX は力覚なし条件での NASA-TLX に比べて有意に低くなった ($p < .001$)．そこで下位尺度ごとに検定を行い，身体的要求 ($p = .021$)，作業成績 ($p = .030$)，努力 ($p < .001$) において有意差を確認した．いずれの下位尺度についても力覚あり条件でのスコアが力覚なし条件のスコアより低くなった（図 10）．

4.6 考察

ターゲットとの誤差は，力覚あり条件が力覚なし条件よ

ⓒ2024 Information Processing Society of Japan

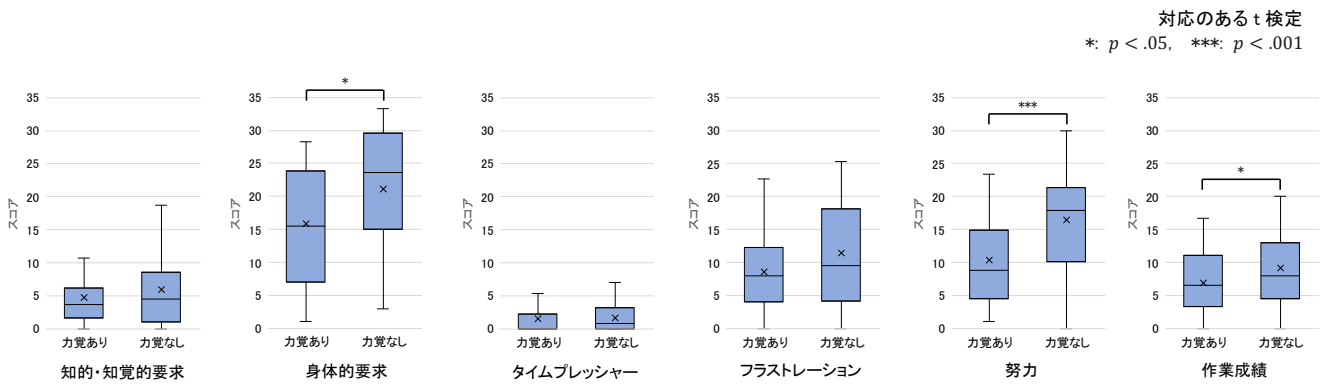


図 10: NASA-TLX の下位尺度の結果

りも有意に小さくなる結果となった．しかし，力覚あり条件で平均 2.60mm ($SD = 1.27$)，力覚なし条件で平均 2.78mm ($SD = 1.75$) の誤差と 2 条件の差は小さいものである．関連研究 [5] [17] では，力覚提示によって誤差が小さくなることが示されており，今回の実験とは異なる傾向が観察された．座位にてスケッチングを行った研究 [17] では，力覚なし条件の場合の誤差は平均 2.68mm となっていた．これらの結果より，実験の姿勢が座位であったことが誤差に影響していると考えられ，スケッチング時にデバイスを把持する腕が安定したことによって力覚なし条件においても十分に誤差が小さくなり，力覚あり条件との差が出なかった可能性がある．この結果を踏まえると，誤差は力覚提示による明確な効果は認められなかったが，少なくともスケッチングを阻害することはなかったと考えられ，力覚提示を行わずに空中に浮かせて書く条件と同様の誤差で使用できることを確認した．

SUS スコアはについては，標準平均が 68 であり，また Aaron らの調査 [18] によると，デバイスを評価した際の SUS スコアの平均値は 71.8 である．これに対して，力覚あり条件での平均スコアは 73.9 であり，平均的なユーザビリティを上回ったと考えられる．一方で，力覚なし条件では 59.6 と平均スコアを下回る結果となったため，力覚提示がシステムの使いやすさを向上させる一因となったと考えられる．これらの評価を踏まえると，本デバイスは力覚提示を行わない場合と同等の誤差で，よりユーザビリティの高いシステムを実現することができると考えられる．

NASA-TLX については身体的要求，作業成績，努力の下位尺度が力覚提示の有無によって変化することが明らかになった．身体的要求は，実験参加者のコメントでは 24 名中の 20 名がデバイスを把持している腕の疲労について言及しており，そのうち 18 名が「力覚あり条件より力覚なし条件のほうが腕が疲れる」といった内容のコメントをした．腕の疲労について言及した残り 2 名はそれぞれ「力覚あり条件と力覚なし条件で同程度の疲労だった」「力覚あり条件は疲れが気になったが，力覚なし条件は書くことに集中して疲労は意識していなかった」といった内容のコメントであった．これらのコメントの内容と NASA-TLX の結果から，実環境の机から得られる反力によって身体的な負担が減少したと考えられる．疲労の原因としてデバイスの重心が高いことに言及したコメントが得られた．Extick Touch はデバイス後端に重量の大きい VIVE Tracker 3.0 を設置しているため重心が高くなり，傾いた際に大きな力で支える必要があったと考えられる．これは位置姿勢の計測装置を Opti Track などの軽量なマーカ等を用いた光学式モーションキャプチャを使用することで改善できると考えられる．作業成績と努力についても共に力覚あり条件が優れる結果となった．実験参加者のうち 15 名は「力覚提示によってターゲットが表示されている面に沿ってデバイスを動かしやすかった」「力覚なし条件では書き始めのタイミングが分かりにくい」「力覚提示なしでは面の姿勢に合わせてデバイスを動かすのが難しかった」といった内容のコメントをした．これらの結果から，力覚提示によって面への接触感を提示することで，面に対して鉛直方向へのデバイスの位置調整に気を配る必要がなくなり，線の位置に合わせてなぞる平面的な動作に集中することができたと考えられる．したがって，力覚あり条件では作業成績と努力の項目が高く評価されたと考えられる．以上を踏まえると，本デバイスは力覚を提示することで，ユーザの腕の疲れを軽減する効果があると考えられる．

作業時間については，力覚なし条件が力覚あり条件より短い結果となった．実験参加者のコメントでは「力覚なし条件で空中で丁寧に書くと疲労感がある」「力覚なし条件で空中で任意の点にとどめるのが難しい」「力覚あり条件でデバイスの伸縮時の振動が気になった」といったものがあった．力覚なし条件では腕の疲労が大きく，空中にデバイスをとどめにくいという事からデバイスを動かす速度が速くなり，作業時間が短くなったことが考えられる．一方で力覚あり条件では，デバイスが実物体に接地しているためデバイス伸縮時の振動が，面をなぞる際のユーザの動きを妨げ作業時間が長くなった可能性があると考えられる．

5. おわりに

本研究では VR 空間におけるスケッチングに Extick Touch を用いた力覚提示システムを構築し，それによって得られる効果について分析を行った．分析の結果，力覚あり条件と力覚なし条件で誤差は同等であることが確認された．また，力覚あり条件ではユーザビリティが高く，作業負荷が低いことが明らかとなった．一方で，力覚あり条件では作業時間が長くなる傾向が見られた．これにより，力覚提示がユーザにとって操作性の向上と疲労軽減に寄与する一方で，より慎重な操作が促進される可能性が示唆された．また，実験参加者からのコメントから，力覚提示による効果は線の種類やデバイスの伸縮速度などの要因によって変化する可能性が示唆された. 実験で得られた結果から，本デバイスによる力覚提示は細かな操作を必要とする作業や，ユーザビリティや作業負荷の改善が求められるタスクに対して有用であると考えられる．

しかし，本研究にはいくつかの制約が存在する．まず，デバイスの重心が高く，腕への負担が増加した可能性がある．これは VIVE Tracker 3.0 の重量によるものであり，より軽量なマーカ等を用いたモーションキャプチャシステムの導入によって改善が期待できる．さらに，実験は座位で行われたため，立位や他の姿勢でのスケッチングにおける力覚提示の効果についても検討が必要である．参加者からのコメントにもあったように，キャンバスの形状や姿勢によって書きやすさが変化するため，これらの要因を考慮した追加の実験が求められる．次に，デバイスの振動や滑らかさに関する問題も指摘された．力覚提示時のデバイスの伸縮に伴う振動が作業時間やユーザビリティに影響を与えた可能性があるため，機構の精度向上やフィードバック制御の最適化によって改善を図る必要がある．

6. 参考文献

[1] Marco Speicher, Anna Maria Feit, Pascal Ziegler, and Antonio Krüger. Selection-based Text Entry in Virtual Reality, In CHI 2018, April 21–26, 2018

[2] Gravity Sketch. https://www.gravitysketch.com/. Accessed on: 2024-10-21.

[3] Inrak Choi, Heather Culbertson, Mark R. Miller, Alex Olwal, and Sean Follmer. Grabity: A wearable haptic interface for simulating weight and grasping in virtual reality. In Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST ’17, p. 119–130, New York, NY, USA, 2017.

[4] 片岡敬志郎，大槻麻衣，柴田史久，木村朝子．先端伸縮型仮想物体接触デバイス ExtickTouch の評価. In MR2021-5, pp. 1–6. 日本バーチャルリアリティ学会複合現実感研究会, 2021

[5] 片岡敬志郎，山本拓也，大槻麻衣，柴田史久，木村朝子．仮想物体への接触感を高める先端伸縮型 デバイスの試作. インタラクション 2019 予稿集, pp. 377–378, 2019.

[6] Rahul Arora, Rubaiat Habib Kazi, Fraser Anderson, Tovi Grossman, Karan Singh, and George Fitzmaurice. Experimental evaluation of sketching on surfaces in vr. In Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI ’17, p. 5643–5654, New York, NY, USA, 2017.

[7] Nicolas Fourrier, Guillaume Moreau, Mustapha Benaouicha, and Jean-Marie Normand. Handwriting for efficient text entry in industrial vr applications: Influence of board orientation and sensory feedback on performance. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 29, No. 11, pp. 4438–4448, 2023.

[8] 3D Systems Inc. Phantom Touch. https://www.3dsystems.com/haptics-devices/3d-systems-phantom-premium. Accessed on: 2024-10-21.

[9] M.Foskey, M.A.Otaduy, and M.C.Lin. Artnova: touch-enabled 3d model design. In Proceedings IEEE Virtual Reality 2002, pp. 119–126, 2002.

[10] Sho Kamuro, Kouta Minamizawa, and Susumu Tachi. An ungrounded pen-shaped kinesthetic display: Device construction and applications. In 2011 IEEE World Haptics Conference, pp. 557–562, 2011.

[11] Yuki Ban, Takashi Kajinami, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Modifying an identified curved surface shape using pseudo-haptic effect. In 2012 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), pp. 211–216, 2012.

[12] Anusha Withana, Makoto Kondo, Yasutoshi Makino, Gota Kakehi, Maki Sugimoto, and Masahiko Inami. Impact: Immersive haptic stylus to enable direct touch and manipulation for surface computing. Vol. 8, No. 2, 2011.

[13] Shingo Nagasaka, Yuki Uranishi, Shunsuke Yoshimoto, Masataka Imura, and Osamu Oshiro. Haptylus: haptic stylus for interaction with virtual objects behind a touch screen. In SIGGRAPH Asia 2014 Emerging Technologies, SA ’14, New York, NY, USA, 2014.

[14] Franz Faul, Edgar Erdfelder, Albert-Georg Lang, and Axel Buchner. G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. Behavior Research Methods, Vol. 39, No. 2, pp. 175–191, 2007.

[15] John Brooke. Sus: A quick and dirty usability scale. Usability Eval. Ind., Vol. 189, 11 1995.

[16] S. Said, Malgorzata Gozdzik, T. R. Roche, J. Braun, J. Rössler, A.Kaserer, D.Spahn, C.Nöthiger, D.W.Tscholl. Validation of the raw National Aeronautics and Space Administration Task Load Index (NASA-TLX) questionnaire to assess perceived workload in patient monitoring tasks: Pooled

ⓒ2024 Information Processing Society of Japan

analysis study using mixed models. J Med Internet Res , vol. 22 , iss. 9 , e19472 , p. 1, 2020.
[17] Daniel Keefe, Robert Zeleznik, and David Laidlaw. Drawing on air: Input techniques for controlled 3d line illustration. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 13, No. 5, pp. 1067–1081, 2007.
[18] Aaron Bangor, Philip Kortum, and James Miller. Determining what individual sus scores mean: adding an adjective rating scale. J. Usability Studies, Vol. 4, No. 3, p. 114–123, 2009

ⒸⒸ2024 Information Processing Society of Japan