

超音波触覚フィードバックを伴う 3D モデリングにおける距離に応じた操作切り替え

古賀 亮^{†1,a)} 松林 篤^{†1} 盧 承鐸^{†1} 篠田 裕之^{†1} 五十嵐 健夫^{†1}

概要：超音波触覚技術は、ユーザの手に装着することなく自由度の高い触覚フィードバックを提示できるため、VR モデリングの使用に適している。そこで本論文では、指先と対象オブジェクトとの距離を考慮した超音波触覚フィードバック付きの VR モデリングシステムを提案する。提案システムでは、オブジェクトに対して触れている時と表面付近に触れている時で操作を切り替え、それに応じて超音波フェーズドアレイによる触覚フィードバックを与える。ユーザは触覚フィードバックの変化により操作の切り替えを認識することで、従来のパネルやコントローラでの切り替えよりも直観的で高速な切り替えを行うことができる。本論文では、作例とユーザスタディの結果を通し、本システムの有用性について検証する。

キーワード：3DCG モデリング, VR, ハプティクス

Distance-based Operation Switching in 3D Modeling with Ultrasound Haptic Feedback

AKIRA KOGA^{†1,a)} ATSUSHI MATSUBAYASHI^{†1} SEUNG-TAK NOH^{†1} HIROYUKI SHINODA^{†1}
TAKEO IGARASHI^{†1}

Abstract: Ultrasound haptic technology provides the user highly flexible haptic feedback without any wearable device, which is suitable for VR modeling. In this paper, we propose a novel VR modeling system with haptic feedback considering the distance between the user's fingertip and the virtual object. In our system, the operation is switched by whether the user touches the object or touches near the surface, and an ultrasonic phased array device changes the haptic feedback accordingly. The user can be aware of the switch as the ultrasound haptic feedback is also switched, which provides more intuitive and faster switching operations than conventional switching with a panel or a controller. We show several examples of generated 3D models and the result of our user study to demonstrate the expressiveness of our operation system.

Keywords: 3D modeling, VR, Haptics

1. はじめに

VR (Virtual Reality) 技術を利用した 3 次元モデル制作は、3 次元の視覚的フィードバックを得ながら 3 次元空間内で立体的操作を行うことができる。これは、3 次元視点移動や変形操作をマウスやタブレットなどの 2 次元入力デバイスと 2 次元ディスプレイを介して行う従来の 3 次元モデ

リングシステムに比べ、初心者にとって操作が把握しやすいと考えられるため、VR モデリング手法に関する研究が近年数多くなされている。

VR 空間内におけるモデリングでの操作方法は主にコントローラを用いた操作 [1], [2] とハンドトラッキング技術を用いた操作の 2 種類に分かれる。特に、ハンドトラッキング技術を用いたモデリング手法はコントローラを介さず手の動きを直接捉えることで直感的な変形操作を支援することが期待されている。しかし、これらの手法における 3 次元変形では、ユーザに変形具合の調整やポリゴン単位の操

^{†1} 現在、東京大学
Presently with The University of Tokyo
^{a)} akira4221@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

作など複雑かつ細かい操作モードの切り替えが強いられており、ユーザにかかる負担が大きい問題がある。

本稿では、オブジェクト表面との距離に応じて変形操作モードを切り替える VR モデリングシステムを提案する。ユーザは Head Mounted Display(HMD) により 3 次元オブジェクトを立体的に観察でき、3 次元オブジェクトに対する変形操作は、デプスカメラによって得られたユーザの指先とオブジェクト表面との距離に基づき行われる。なお、ユーザへのフィードバックは HMD による視覚提示のみならず、空中超音波触覚ディスプレイ (Airborne Ultrasound Tactile Display, 以下 AUTD)[3] による触覚提示が同時に行われ、視覚提示のみでは把握困難な視線奥行方向に対するオブジェクト表面との距離感や操作モードに対するフィードバックを得ることができる。

本研究では提案システムに則した表面の盛り上げ操作と掘り下げ操作の 2 つの変形操作モードを提案する。盛り上げ操作は指がオブジェクト表面上にある時に操作が開始し、指が表面より素早く離れるまで指の高さまで表面を盛り続け、操作前および操作中は弱い触覚フィードバックが提示される。一方、掘り下げ操作は指がオブジェクト内部にある時に操作が開始し、オブジェクト内部にある間は指の高さまで表面を掘り下げ、強い触覚フィードバックが提示される。以上の変形操作を以って、3 次元モデリング作業におけるユーザの変形モード切り替えの煩雑さが減ることで、操作性の向上及び効率化が期待される。最後にユーザスタディの結果を通して、本研究の有用性を検証する。

2. 関連研究

2.1 ハプティクス

ハプティクス技術の導入により、没入型仮想環境におけるインタラクションシステムの使い勝手を大きく向上させることができる。そのため仮想環境を探索するための触覚フィードバックに関する研究は多く行われており、大きく 2 種類の手法がある。

1 つ目はユーザの指や手のひらに装着するハプティックデバイスを利用する方法である。触覚デバイスとしては、振動触覚デバイス (CyberTouch[4])、モータ駆動ベルト (GhostGlove[5])、ピン配列ユニット (SaLT[7])、圧電素子 (DextrES[6]) がある。これらの装着型の手法は実作業に入る前に装置を装着する手間が必要であり、また装着により手の動作に制限がかかる場合がある。

もう 1 つの手法はデバイス装着型手法に対して装置を直接装着することなく、離れた場所から風圧 [9], [10] や超音波 [3], [11], [12], [13] などで触覚フィードバックを提供する方法である。Suzuki ら [9] は、エアジェットを用いて非接触の力覚的フィードバックを提供する手法を提案している。エアジェットは大まかな形状などの力覚的フィードバックには使用することができるが、ジェット上空部に触

覚フィードバックを掲示するため、詳細な形状などの触覚フィードバックを表現することはできない。触覚フィードバックとして超音波を使った手法として Iwamoto らが提案した Airborne Ultrasound Tactile Display(AUTD)[3] がある。AUTD では複数の超音波トランスデューサから発せられた超音波を合成させることで、自由空間内の任意の点に所望の圧力パターンを描画することができ、ユーザは素手で圧力を感じることができる。本研究では AUTD を使用することでユーザに自由度の高い触覚フィードバックを提供し、VR 空間内で素手で操作可能なモデリングシステムを構築した。

2.2 触覚フィードバックを伴うモデリング

3DCG モデリング制作の上でも触覚フィードバックを与える機材は導入されており、実制作においても入出力装置として Touch USB[14] を用いた GeomagicR Sculpt[15] や Freeform[16] などのアプリケーションが用いられている。また触覚フィードバックを手や指先に返しつつ、手や指の動きによって変形を行うモデリングシステムに関する研究もなされている。McDonnell ら [17] は PHANToM 触覚デバイスを指に装着したスカルプティングシステムを提案し、Olsson ら [18] は PHANToM デバイスに手で握ることで指先や関節の位置を計測する装置を付けたスカルプティングシステムを提案している。しかし、AUTD などユーザに非接触な触覚デバイスを用いたモデリングシステムの評価などは行われておらず、本研究では AUTD による非接触型触覚フィードバック装置のモデリングにおける有用性を検証した。

3. 提案システム

本研究では仮想空間の座標系を AUTD の中心を原点とする鉛直上方向を Y 軸、奥行き方向を Z 軸にした 3 次元座標系で議論する。

3.1 システム概要

本システムのユーザインタフェース (図 1a, b) は VR 出力装置として HTC VIVE、触覚フィードバック出力装置として AUTD、ハンドトラッキング入力装置として RealSense D415 2 台を用いて構成される。図 1(c) は VR 装置に出力される映像である。本研究では操作切り替えの有用性を確かめるため、変形オブジェクトのモデルを上面を 128×128 の格子状のメッシュで構成された簡易的モデルを使用し、点群で構成されたバーチャルハンドを用いて変形する。ユーザは片手で人差し指を立て、仮想空間内での指先でオブジェクトに対して格子状メッシュの頂点を高さ方向のみ操作することで変形を行う。

変形操作は変形操作は掘り下げ操作と盛り上げ操作の 2 種類があり、仮想指と操作オブジェクト上面との距離に応

じて自動的に切り替えられ、オブジェクトに対して指をその距離範囲内においてから一定時間待機したあと操作が開始する。オブジェクトに指を入れている場合は指先に沿って上面が掘り下げられる操作が行われ、またオブジェクトの表面上層付近に指がある場合盛り上げ操作が行われ、指先に従ってオブジェクト空間内で指の下にある上面が盛り上がり、仮想指が一定速度でオブジェクトから離れると操作が終了する。指先がオブジェクトに近づくと図1(b)のように 2×3 の弧状に配置されたAUTDから指に対して、実際のオブジェクトに触れている感覚に基づき、仮想指がオブジェクトの中にある掘り下げ操作の間はしっかりとした強い触覚、表面上層付近にある盛り上げ操作の間は弱い触覚のフィードバックが提供される。ユーザはVRによる立体視覚と触覚フィードバックによりオブジェクトとの距離及び現在の操作を認識しながら、操作を切り替えつつオブジェクトを変形させることができる。

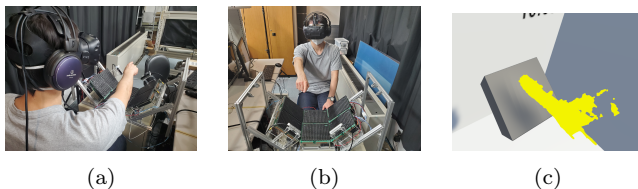


図1 (a) 提案システム. (b) 使用機材. (c) VR 環境.

3.2 空中ハプティクス (AUTD)

AUTDでの超音波制御手法は主に2種類あり、Amplitude Modulation(AM)とLateral Modulation(LM)[19], [20]と呼ばれている。

AMは焦点位置を固定したまま振幅の波形を変調させることで音響放射圧を制御し、振動触覚の周波数を人間が知覚可能なレベルにする手法であり、LMは音響放射圧の強さを一定に保ちながら水平方向に繰り返し移動する焦点によって、皮膚に振動触覚刺激を与える手法である。AMでは出力超音波の振幅を時間的に変動させるため、焦点における平均音響放射圧の値は最大振幅より小さくなってしまいが、LMは出力超音波の振幅を固定できるため、常に最大振幅の触覚を運動の中心で感じることができ、AMより強い触覚を提示できる。

そこで本研究ではLMを採用し、空間対称性から焦点の軌跡を周期的な円運動となるように遷移させ[19], [20], その運動範囲の半径を切り替えることで触覚の強弱を制御した。

3.3 指の点群抽出

RealSenseから得られた深度画像はノイズが含まれたり、手以外の深度もとる(図2(c))ため、手の部分だけの点群になるように予め深度画像から抽出部分を決定する必要がある。

ある。

まず、深度画像から最終的に抽出する点群を選択するために深度画像と同じサイズのブーリアン画像を作成する。その後 RealSense から得られた RGB 画像(図2(a))における各ピクセルごとのRGB値をHSV値($H: -180^\circ \sim 180^\circ, S: 0 \sim 255, V: 0 \sim 255$)に変換し、HSVの各値が一定範囲内にあるピクセルと対応するブーリアン画像内でのピクセル値をTrueに、それ以外をFalseにする(図2(d))。次にブーリアン画像にClosing処理を施しピクセル間の隙間を補完する(図2(e))。その後、深度画像の各深度値で閾値以上または以下であるピクセルに対応するブーリアン画像のピクセル値をFalseにする(図2(f))。最後にErosion処理を施し、指周りや空間内のノイズ等を処理する(図2(g))。そうやって生成したブーリアン画像をもとに対応する深度画像から点群を生成する。手の点群を抽出した後、ノイズ除去及び人差し指に値する点群を以下の簡易的な手法で抽出する。仮想空間内で点群をZ軸方向でソートし、N番目に奥にある点から一定範囲 r_i にある点群を抽出する。同様の操作をX、Y軸方向でもそれぞれ行い、最終的に抽出された点群を指先の点群とする。本システムでは人差し指だけを奥行き方向に伸ばしたジェスチャーで操作するため、上記の手法で指先部分の点群を抽出することができ、処理する点群の数を大幅に減らすことができる。ただし、X軸方向に関しては利き手に応じて端点とする方向を反転させる必要がある。

このように抽出された指先点群に対して、その中央値座標に現在の操作に応じた触覚フィードバックを返す。また各変形操作開始のタイミングに関して各操作領域に入ればすぐ操作開始すると誤って指や除去しなかったノイズ点群がオブジェクトに入った時に勝手に操作開始したり、指をオブジェクト内部に入れる前に表層付近での操作を開始してしまう恐れがある。そのため、仮想指が各操作領域に入りつつしてから一定時間経過後に操作を開始できるようにオフセット時間を400ms設けた。

本研究では $-30^\circ \leq H \leq 30^\circ, S \geq 130, V \geq 12$ の範囲になるようにRGB画像を処理し、手の肌色部分に近い色の点群を抽出するようにした。またClosing, Erosion処理の大きさを5(画像サイズは高さ480, 幅640)とし、深度画像ではエラー値である0を除去するように、指先抽出において一定範囲 $r_i = 1.5\text{mm}, N = 10$ と設定した。

3.4 変形操作

操作切り替えや触覚フィードバックを制御するため、指とオブジェクト上面との距離を3.3節で抽出した指先点群を用いた以下アルゴリズムで求める。

まず指先点群 S_f に対して点の大きさを r_p とし、オブジェクト底面に対して並行な平面で各点において点の位置を中心とする半径 r_p の円を底面とする円柱範囲内のメッ

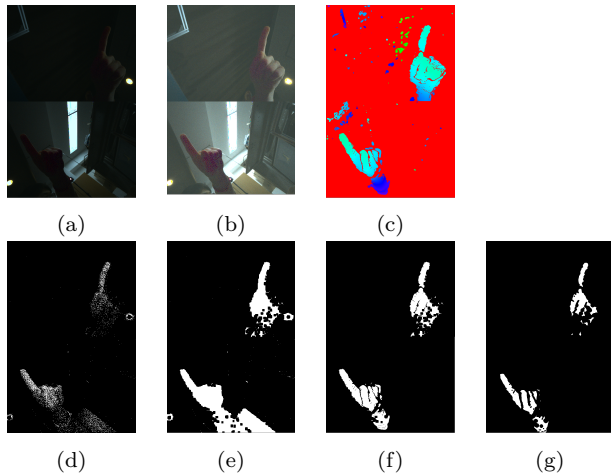


図 2 Realsense から色を抽出する過程. (a) RGB 画像. (b) 見やすく調整した RGB 画像. (c) 深度画像 (赤い部分が深度値 0). (d) HSV による抽出後のブーリアン画像. (e) Closing 処理後. (f) 深度検査後. (g) Erosion 処理後.

シュ頂点を抽出する. その後, 各頂点とその点のオブジェクト空間内での高さを比較し, 内部閾値 h_i 以下となる頂点があるなら内部の点群 S_i , 表面閾値 h_s 以下となる頂点があるなら表面の点群 S_s に入れる. S_i/S_s にそれぞれ一定数以上の点群がある時, 掘り下げ操作/盛り上げ操作を開始する. これらの変形操作及び切り替えは実際に操作・変形する上でユーザが直観的に変形できるように変形手法を割り当てた.

3.4.1 掘り下げ操作

掘り下げ操作は現実での制作においても, 粘土を指で押し込むような変形をするなど, フリーハンドで最も使われる変形操作の一つであり, ユーザに馴染みが深い. 本システムではオブジェクト内部に入った指先と同じ高さになるように, 以下の方法で変形を行う.

内部点群 S_i の各点において, メッシュの各頂点から先ほどと同様に点の位置を中心とする半径 r の円柱範囲内のメッシュ頂点を抽出し, 自身よりオブジェクト空間内で高い位置にある頂点の高さを自身の高さと同じになるように下げる. 点群の範囲は被る場合があるため, 各頂点は各点に対する掘り下げ分の変位を記録し, 点と頂点との円柱底面上における距離に応じた重み付き平均値分の高さを下げる. 実際にはノイズなどを考慮し, 高さの変位が閾値以下なら高さを下げず, また誤操作などの可能性も考慮して, 算出された高さの変位に減衰定数 $A(< 1)$ をかけることで, 急激な変形を行わないようにしている. 各頂点の高さを下げた後, 変化した頂点集合の Bounding Box をとり, その範囲内でガウシアンフィルタをかけ, オブジェクト表面の平滑化を行う.

3.4.2 盛り上げ操作

盛り上げ操作は現実の制作において, 粘土をつまんで引っ張るなど二本の指で行うことが多く, 一本指操作において

は粘着物を指に引っ付けて引っ張るような操作が最も直感的であると考えられる. そこで, 掘り下げ操作と対称的に, S_s の各点に対して半径 r の円柱範囲内のメッシュ頂点を抽出し, 自身よりオブジェクト空間内で低い位置にある頂点の高さを自身の高さと同じになるように上げる. 盛り上げ操作も同様に各点による変位の重み付き平均をとり, 一定値以下の変位の切り捨て及び変位に対して定数 $A(< 1)$ をかけ, 最終的に変化した頂点集合の Bounding Box をとり, その範囲内でガウシアンフィルタをかけ, オブジェクト表面の平滑化を行う.

しかし, 掘り下げ操作ではそのアルゴリズムや実際の制作においても指を動かすことで掘り下げ範囲を拡張できるのに対し, 盛り上げ操作の場合は指を動かすと, 指がオブジェクト表層よりさらに上の空間に移動し, S_s が次のステップに入らない, つまり操作が終了してしまうことがある. これは掘り下げ操作に対して対称的でなく, また壁などを作りたい場合に何度も盛り上げる必要がある. そのため, 本システムでは盛り上げ操作開始後に, 指がオブジェクト表層範囲から抜け出し, S_s の大きさが 0 になったとき, 指先点群 S_f を S_s の代わりとして引き続き盛り上げ操作を行う. こうすることで, 指を横に動かして壁を作ることができたり, 上にあげて操作が中断されることが少なくすることができる. このような変形は現実の制作にはないものの, 実際の Sculpting ツールである Blender[21] などでもオブジェクト表面に対してマウスやタッチペンなどを動かした部分を盛り上げ続けるといった操作があり, 直観的であると考えられる.

操作の終了は S_s の座標中央値となる点 (以下, 中央値点) を計測し, その中央値点のオブジェクト空間内での高さ変位が閾値を超えたタイミングとした. 3.3 で述べたようにオブジェクト内部に指を入れようとして, 表層範囲に指を近づけた時, 操作を開始してしまうことがある. たとえオフセット時間を設けてもそれ以上の時間経過でゆっくり近づけたりした時などで誤操作を起してしまう可能性がある. そこで指先点群 S_f の中央値点のオフセット時間内での移動距離が一定距離以下なら盛り上げ操作を開始できるようにすることで, 指がその領域内で一点に留まり続けて操作が開始するというを実現した.

4. ユーザスタディ

4.1 実験手順

AUTD による超音波触覚フィードバックのモデリングにおける有用性と, オブジェクトとの距離に応じた操作自動切り替えの有用性を検証するためユーザスタディを行った (図 3(a)). 今回, 比較実験のために

- ボタンによる操作切替 & 触覚フィードバックあり (Button & Haptic)
- オブジェクトとの距離による自動操作切替 & 触覚

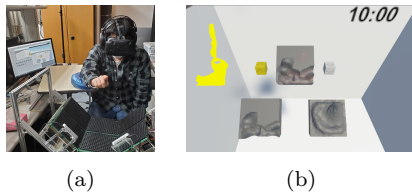


図 3 (a) ユーザスタディの様子. (b) Button & Haptic 環境の UI. 残り時間は奥の壁の右上に表示される.

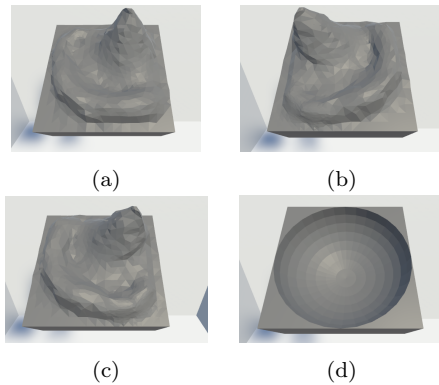


図 4 ユーザスタディで例示した形状. (a)~(c) を複製タスクで用い, (d) は各操作環境での練習に用いた.

フィードバックあり (Distance & Haptic)

- オブジェクトとの距離による自動操作切替 & 触覚フィードバックなし (Distance & Non-haptic)

の 3 種類の操作環境を用意した.

Button & Haptic 環境では従来のモデリング手法のようにユーザが変形オブジェクトの左右にある立方体のボタンをタッチすることで操作を選択し, その変形操作でモデリングを行うことができる (図 3(b)). 選択されたボタンは黄色に変わり, 右のボタンを選択すると掘り下げ操作, 左のボタンを選択すると盛り上げ操作が選択される. また, 盛り上げ操作の操作開始もオブジェクト表層ではなく, 一旦オブジェクト内部に指を入れ留めてから操作開始をすることにした.

実験参加者は 20 代から 30 代の男性 10 名と女性 3 名の計 13 名で行った. 参加者の 75% が VR 経験がほとんどなく, ほとんどの参加者がモデリング経験がないか数回程度のモデリング初心者であった. 実験の手順は以下の通りである.

- (1) 参加者に本システムの UI 部分の説明 (3 節) と触覚に関して説明し, 仮想オブジェクトとの距離感覚を掴むため, 最大 1 分間のトレーニング時間を設ける. この際触覚の提示及びオブジェクトの変形は行わない.
- (2) 参加者は 3 種類の操作環境でそれぞれ最大 3 分間の操作練習および UI の確認を行い, その後こちらがそれぞれで指定した形状を模倣する (最大 10 分間).
- (3) 参加者が Distance & Haptic 環境で作成できる形状を各自で考え, 最大 10 分間で制作する.

模倣制作を行う操作環境の順番は全 6 通りを平等に行わ

れるように, 選択されず残った順番から各実験の事前は無作為に選び, 全通り選択されたらまた 6 通りから選び直した. 模倣する形状は難易度に差が出ないように, 1 つの有機的な形状を回転・反転させた 3 種類 (図 4(a)~(c)) を準備し, 制作する順番も各環境で平等に制作されるよう同様に事前は無作為に抽出した. 図 4(b) は図 4(a) を反時計回りに 90 度回転させた形状であり, 図 4(c) は図 4(b) を鏡面反転させた形状である VR 酔いの防止のため, 各制作時間は最大 10 分間とし, 各操作環境での模倣制作の後にその環境での 5 段階リッカート尺度式アンケートと自由記述を行った. また全操作環境での制作を終えた後に 3 種類の環境について比較アンケートを行い, 自由制作後に自由制作に関するアンケートを行った. 本実験は現地で行い, 参加者には謝礼として 3,000 円を支払った.

今回の実験では指定された形状の模倣を行うため, 全操作環境において図 3(b) に示す UI を用意した. 一番奥にあるオブジェクトが変形オブジェクトであり, 手前 2 つのオブジェクトは変形不可能である. まず右手前にあるオブジェクトが模倣される形状であり, また一番奥にある変形オブジェクトにも同じ形状が透明な赤色のオブジェクトとして重ねられている. 実験参加者は模倣形状を観察しながら, 変形オブジェクトでの変形過程を考え, 赤いオブジェクトの形に沿うように変形オブジェクトの各格子メッシュの頂点の高さを変化させる. 透明な赤い模倣形状と重なりにより, 変形オブジェクトの実際の形状の認識を誤る可能性があるため, 左手前にあるオブジェクトに変形オブジェクトと同じ形を投影し, 参加者が手前両サイドのオブジェクトで形状の比較ができるようにした. また自由制作では図 3(c) に示すように, 手前側の 2 つのオブジェクト及び赤い基準オブジェクトを非表示にした.

本実験において内部閾値 $h_i = 0mm$, 表面閾値 $h_s = 5mm$ として実験を行った.

4.2 実験結果

図 5, 6 はユーザスタディによる作成結果の一例である. 前者は模倣制作での作成結果の一部であり, 操作環境と例示オブジェクトの組み合わせごとに代表的な形状を 1 つずつ掲載している. 掲載基準は例示オブジェクト (図 4) との誤差が少ないものの中から選んでおり, 2 行 3 列目と 3 行 1 列目は同じ参加者から作成された形状である. 青の箱ひげ図が Button & Haptic 環境, オレンジが Distance & Non-haptic 環境, 灰色が Distance & Haptic 環境に対応している. 各模倣結果と例示オブジェクトとの誤差は, 操作オブジェクトの各格子状メッシュの頂点の高さとそれに対応する例示オブジェクトの表面の高さの二乗誤差の総和 $[m^2]$ で計算しており, 前述の図 5 の掲載基準にした. 図 7(b) の箱ひげ図の下 の 3 つの数字はそれぞれ左から対応する箱ひげ図の分散であり, 図 5 から分かるように作成された形

状に対して、顕著な差は生まれなかった。また図 7(a) では Button & Haptic 環境が最も制作時間の平均値が小さく、箱ひげ図の形状から時間的に制作時間が最も短くなる環境に見えるが、最小値を除いた平均値は 527.917 秒であり、他の操作環境と大差ない。

図 6 は自由制作での 13 個の作例のうちの一部である。結果から分かるように平面的な顔を模したお面のような形状 (図 6(a),(c)) や、特定の記号や模様を模したもの ((図 6(e))), かたつむり (図 6(d)) やアンモナイト (図 6(f)), コップ (図 6(b)) 等のような立体的形状など様々な形状が Distance & Haptic 環境で作成できることがわかった。

図 7 は全環境での模倣制作を終えた後でとった比較アンケートの結果である。図 7(a), (c) から参加者はボタンでの操作切替を選んでいることがわかり、これは盛り上げ操作での比較結果 (図 9) でも伺える。しかし、Distance 環境を好んで選択する被験者もあり、図 7(a) の平均値が 2.8 であることからわかるように、Distance 環境も一定の評価を得ている。図 7(b), (c) から少なくとも Distance 環境において AUTD による超音波触覚フィードバックはモデリングに関して有用だということが考えられる。

図 9 は各操作環境での 5 段階リッカート尺度アンケートの結果であり、図 7 と同様の対応をしている。Button 環境において掘り下げ操作や盛り上げ操作の評価は Distance の両操作環境より高い評価を得ており、特に盛り上げ操作での差が顕著に見られた。また Distance 環境においても Non-haptic 環境の掘り下げ操作の評価は Haptic 環境より低い評価となっており、形状の作成しやすさや操作切替、操作に関する信頼性などにおいても大きな差ができています。

触覚フィードバックに関して、ユーザからは「距離での切り替えにおいて触覚は絶対にあつた方がいい」「触覚で物体に触ってるかどうか、より分かりやすくなる」「指や視線を動かすことなく操作が可能であった」「表面に触れていることがわかりやすく、意図して盛り上げがやりやすかった」「色のフィードバックより触角のほうがいい、触覚を通して掘ってる感覚が得られた (色でのフィードバックでは得られない)」や「オブジェクトと指の位置関係が触覚によってわかった」という好意的な意見が多かった。一方で「表面の触覚がわかりにくい」「より現実に近い触覚提示があるべき」「触覚の強弱の認識は難しい、意識を割く必要がある」「振動感以外にも触覚のバリエーションが欲しい」「物体表面と内部で与えられる触覚を明らかにちがう刺激にしてほしい」という意見もあった。

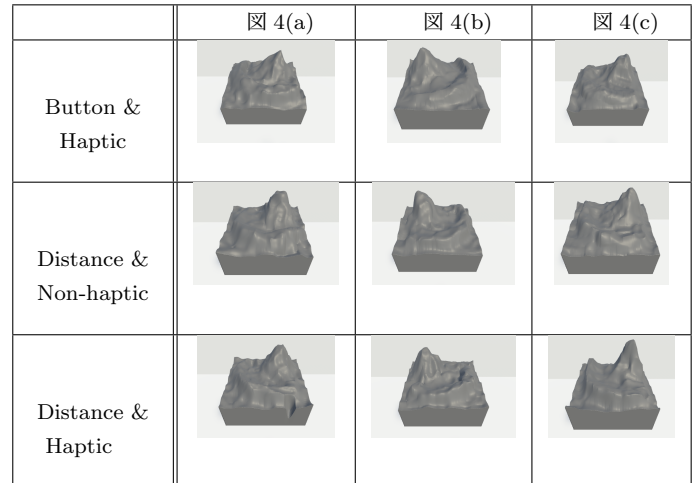


図 5 模倣制作の結果 (代表例)。

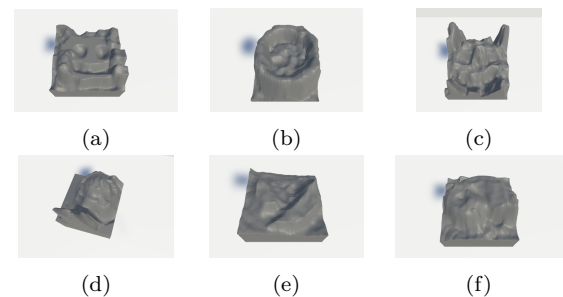


図 6 自由制作の結果。

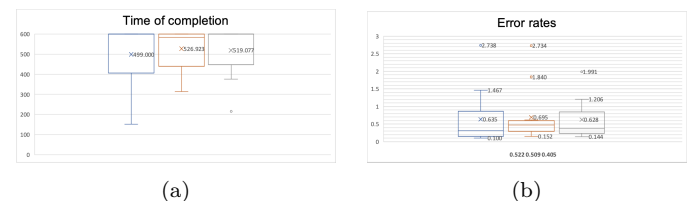
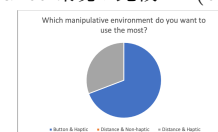


図 7 模倣制作に関する数値的結果。青が Button & Haptic 環境、オレンジが Distance & Non-haptic 環境、灰色が Distance & Haptic 環境を表す。(a) 完成・終了までの時間 (秒)。(b) 各作品の誤差 (m^2)。各箱ひげ図の下はそれぞれの分散値。



(a) Button 環境と Distance 環境の比較。(b) 触覚の有無に関する比較。



(c) 3 種類の環境同士の比較。

図 8 比較アンケートの結果。各箱ひげ図の下はそれぞれの分散値。

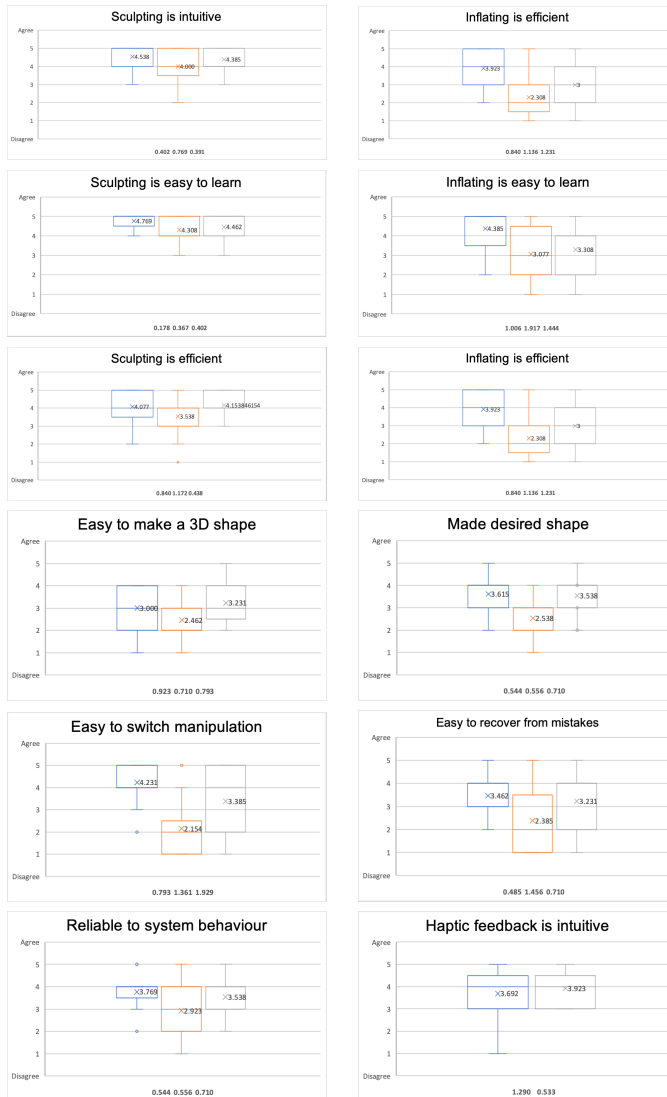


図 9 各環境でのアンケート結果。青が Button & Haptic 環境, オレンジが Distance & Non-haptic 環境, 灰色が Distance & Haptic 環境を表す。各箱ひげ図の下の値はそれぞれの分散値。

4.3 考察

図 7(a), (c) では本提案手法である Distance 環境より Button 環境の方が操作しやすいという結果にはなったが、「表面がわかりにくかったためボタンの方がやりやすかった、表面と内部の差がもっとわかりやすかったら距離の方が操作しやすいかもしれない」「誤操作がもっと少なければ、その場で切り替えられる方がやりやすい」という意見が多数得られ、Distance 環境が改良されれば、Button 環境より操作しやすくなりうると考えられる。

Distance 環境の利点は「操作をその場で即時で切り替えられる」ことであるが、勝手な切り替えによる誤操作を起こす可能性がある。ユーザスタディでも誤操作により変形をうまく行うことができず、今まで作成してきた形状が崩れたりしてしまう、操作を何度もやり直すという状況を何度か観測され、そのような意見も多かった。一方 Button 環

境は操作を固定できるため「誤操作が起きない安心感がある」と感じるユーザが多く、Button 環境の方が好まれた大きな要因であり、Distance 環境の誤操作が起こりやすさと、オブジェクトの表面を認識しづらさによる盛り上げ操作の難易度の高さが本システムの評価を大きく下げていると考えられる(図 9)。コメントや観察などから誤操作を引き起こしやすい状況は以下の通りである。

- 凹凸がある面を操作している時
- 表面に指をゆっくり近づけている時
- 勾配のある斜面を操作する時

凹凸や勾配のある斜面は盛り上げ操作途中や表面入る段階で、オブジェクト内部に指が入ってしまうことで操作の中断や移行が行われる可能性があり、また少し削りたい時など表面にゆっくり指を近づけている時はオフセット時間を超えて表面に指を止めることがあるため誤操作を起こす。これらの解決策としてオブジェクトとの距離だけでなく、指の動きに従ってでも操作が切り替わったか判断するというものを考える。

例えば指が横に移動している時はオブジェクト内部にいても盛り上げ操作を中断せず、オブジェクト内部に指を止めて下方向に大きく進んだら掘り下げ操作に切り替える。こうすることで盛り上げすぎた後に、そのまま掘り下げ操作で調整するといった Distance 操作での利点を残したままより直感的な操作の切り替えを実現できる。

また指先の移動とオブジェクトとの距離による操作切り替えは指先が上下に移動した動きを追従することで操作開始を制御でき、オフセット時間のいらぬよりスムーズな操作切替を提供できると考えられる。実験でも「掘り下げた後に別の掘り下げたいところを掘ろうとするとまた 400ms 待たないといけないのが面倒で掘り下げに 400ms は長い、盛り上げるときは 400ms でもいい」といった意見もあり、「掘り下げすぎて盛り上げなおすのにすんなりできない」など、400ms 動作が停止するだけでも面倒を感じるユーザもいる。オフセット時間は勝手な盛り上げ操作の開始を防ぐために設けた時間であるが、オブジェクトに対して指を近づけるときに内部に到達するまで表面に滞在する時間を 400ms 以内にできるように、実験では表面の範囲がオブジェクト表面から 5mm と設定する必要もあった。この 5mm の薄さは多くのユーザに「表面が認識しづらかった」と感じさせた大きな要因の 1 つと考えられる。指の動きのように時間制御から方向制御に切り替わることで、400ms の時間的制約もなくなるだけでなく、この表面の範囲を広げることができるため、操作切り替えのラグ及び盛り上げ操作が開始する「表面がわかりにくい」といった意見も解消されるであろう。

最後に Button 環境と Distance 環境を混合させた Hybrid 環境について議論する。本システムの問題点として、微調整が難しいといったことがあげられ、そして Button 環境

は微調整が簡単であるが、局所的な部分の変形を行う上で何度も切り替えるのが面倒であるという問題点がある。そこで Button による操作を切り替えを主として、その操作候補の中で Button により Distance 環境に切り替えることを可能とする操作を取り入れた Hybrid 環境を提案する。こうすることで細かい調整を Button 環境で、局所的なおおまかな変形を Distance 環境でスムーズに行うといった双方の利点を活かした制作が可能であると考えられる。

5. 今後の展望とまとめ

本研究では操作切替システムでは、オブジェクトと指との距離に応じて操作を自動的に選択され、大きな中断もなく効率的に操作を続けることができるモデリングシステムを提案した。ユーザは触覚フィードバックの違いにより現在の操作を認識することができ操作性の向上につながった。一方で本システムは従来の操作手法に対してまだ使いやすさといは言い難い。より多様かつ効率的なモデリング操作を提供するため、指先の移動でも操作の切り替えや開始を行えるように調整することで誤操作の発生減少の達成、さらにハンドジェスチャーでも操作を切り替えられるようにするなどの発展が見込まれる。また触覚フィードバックの改修などを行い、より現実のモデリングに近いユーザフレンドリーな操作体系およびユーザ体験を実現できることが期待される。

謝辞 本研究を進めていくにあたり、感染症の蔓延が危惧される中、ユーザスタディに参加し、貴重な意見をくださった参加者の皆様に感謝を申し上げます。本研究は JST CREST JPMJCR17A1 の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] Google Inc., Google Blocks, 入手先 (<https://arvr.google.com/blocks/>) (参照 2021-02-03).
- [2] Sketchbox Inc., SculptVR, 入手先 (<http://sculptvr.com/>) (参照 2021-02-03).
- [3] Iwamoto, T., Tatezono, M., and Shinoda, H.: *Non-contact Method for Producing Tactile Sensation Using Airborne Ultrasound*, Haptics: Perception, Devices and Scenarios, EuroHaptics 2008, pp. 504-513(2008).
- [4] CyberTouch, 入手先 (<http://www.cyberglovesystems.com/cybertouch>) (参照 2021-02-11)
- [5] Minamizawa, K., Kamuro, S., Fukamachi, S., Kawakami, N., and Tachi, S.: *GhostGlove: Haptic Existence of the Virtual World*, SIGGRAPH '08: ACM SIGGRAPH 2008 posters, pp. 18(2008).
- [6] Hinchet, R., Vechev, V., Shea, H., and Hilliges, O.: *DextrES: Wearable Haptic Feedback for Grasping in VR via a Thin Form-Factor Electrostatic Brake*, Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 901-912(2018).
- [7] Seung-Chan, K., Chong, H. K., Gi-Hun, Y., Tae-Heon, Y., Byung-Kil, H., Sungchul, K., and Dong-Soo, K.: *Small and lightweight tactile display(SaLT) and its application*, World Haptics 2009 - Third Joint EuroHaptics conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 69-74(2009).
- [8] Sato, K., Minamizawa, K., Kawakami, N., and Tachi, S.: *Haptic telepresence*, ACM SIGGRAPH 2007: Emerging Technologies, SIGGRAPH'07, pp. 10-13(2007)
- [9] Suzuki, Y. and Kobayashi, M.: *Air jet driven force feedback in virtual reality*, IEEE Computer Graphics and Applications, vol.25, no.1, pp. 44-47(2005)
- [10] Sodhi, R., Poupyrev, I., Glisson, M., and Israr, A.: *AIREAL: Interactive Tactile Experiences in Free Air*, ACM Trans. Graph., vol. 32, no. 4, pp. 10(2013)
- [11] Alexander, J., Marshall, M. T., and Subramanian, S.: *Adding Haptic Feedback to Mobile Tv*, CHI EA '11: CHI '11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, no. 5, pp. 1975-1980(2011)
- [12] Carter, T., Seah, S. A., Long, B., Drinkwater, B., and Subramanian, S.: *UltraHaptics: Multi-Point Mid-Air Haptic Feedback for Touch Surfaces*, UIST '13: Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 505-514(2013)
- [13] Long, B., Seah, S. A., Carter, T., and Subramanian, S.: *Rendering Volumetric Haptic Shapes in Mid-Air Using Ultrasound*, ACM Trans. Graph., vol. 33, no. 6, pp. 1-10(2014)
- [14] 日本バイナリー株式会社, Touch USB, 入手先 (<http://www.nihonbinary.co.jp/Products/VR/Haptic/Phantom/Touch.html>) (参照 2021-02-03).
- [15] 日本バイナリー株式会社, Geomagic Sculpt, 入手先 (<http://www.nihonbinary.co.jp/Products/3DModeling/Sculpt.html>) (参照 2021-02-11).
- [16] 日本バイナリー株式会社, Freeform, 入手先 (<http://www.nihonbinary.co.jp/Products/3DModeling/Freeform.html>) (参照 2021-02-11).
- [17] McDonnell, K. T., Qin, H., and Wlodarczyk, R. A.: *Virtual Clay: A Real-Time Sculpting System with Haptic Toolkits*, I3D '01: Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics, pp. 179-190(2001)
- [18] Olsson, P., Nysjö, F., Aneer, B., Seipel, S., and Carlbom, I. B.: *SplineGrip: An Eight Degrees-of-Freedom Flexible Haptic Sculpting Tool*, SIGGRAPH '13: ACM SIGGRAPH 2013 Posters, no. 50(2013)
- [19] Takahashi, R., Hasegawa, K., and Shinoda, H.: *Tactile Stimulation by Repetitive Lateral Movement of Midair Ultrasound Focus*, IEEE Transactions on Haptics, vol. 13, no. 2, pp. 334-342 (2019).
- [20] Takahashi R., Mizutani S., Hasegawa K., Fujiwara M., and Shinoda H.: *Circular Lateral Modulation in Airborne Ultrasound Tactile Display* Haptic Interaction, AsiaHaptics 2018, vol. 535, pp. 92-94(2019).
- [21] Blender, 入手先 (<https://www.blender.org>) (参照 2021-02-11)