

PhonePedestal: 深度カメラ付きのスマートフォンを台座とした3Dモデリング

武山 侑輝^{1,a)} 西川 宜利¹ 志築 文太郎²

概要:我々は、3Dモデリング初心者を含むユーザに向けたラピッドプロトタイプシステムを実装した。本システムは、深度カメラ付きのスマートフォンを台座として用いた3Dモデリングシステムである。スマートフォン前面の深度カメラを用いて取得された手の動きを認識することにより、ユーザは3Dモデルを容易に作成できる。また、スマートフォンを回転することにより、オブジェクトに対する視点を変更できる。さらに、本システムは、手の動きを画像認識によって検出する。これにより、複数人が同時にモデリングすることもできる。本研究では、本システムの基本機能を評価するために、3Dモデリングにかかる時間を検証した。実験の結果から、各ユーザのモデリング時間にはばらつきがあるものの、初心者でも3分以内に3次元の自由ストロークを伴う3Dモデリングを行うことができることが示された。また、ユーザビリティに関しては改善の余地があり、特に削除のためのハンドジェスチャおよび振動フィードバックの機能の修正が求められた。

1. はじめに

3Dモデリング技術は、製品設計、ゲーム開発、教育、医療、建築および映画製作などの多くの分野に应用されている。しかし、高い柔軟性と表現力を持つために、専門的な知識が必要であるため、特に初心者にとってその複雑性は大きな障壁となっている。特に、Blender および Maya などの3Dモデリングツールは豊富な機能を提供するが、学習コストが高いため初心者が3Dモデルを容易に構築することを妨げている。一方、VRまたはAR技術を活用した3Dモデリングは、3Dスケッチシステムなどにより、学習コストを低減できる。ただし、これらの技術はヘッドマウントディスプレイ(HMD)の使用を前提としているため、装着が必要および携帯性が低いという問題がある。この問題は、3次元形状のメモを即座に行うことが求められる場面において顕著である。例えば、エンジニアおよびデザイナーが会議中にアイデアを共有する際に、既存の3Dモデルに3次元形状を追加する、アノテーションを追加する、あるいは新たな3Dモデルのラピッドプロトタイプを行うことは困難である。さらに、これらの技術を使うにはユーザがHMDを装着する必要があるため、マウスやトラックパッドを必要とするBlender および Maya などの3Dモデリングツールとこれらの技術を合わせて用いることはHMDの

着脱を繰り返す必要があるため困難である。また、HMDを用いないモバイルデバイス単体のAR空間における3Dスケッチシステムが存在するが、小さな2Dディスプレイの限られた視覚情報による操作のため、操作領域が限られる[1]。さらに、複数人の協調作業を行う際には、同じ場所で同時に複数人が3Dスケッチを行うことが困難である。

本研究では、上記の問題を解決するため深度カメラ付きのスマートフォンを台座として使用し、PCにおける3Dモデリングを補完するシステムを構築した。本システムは、PCを用いたモデリング操作にて学習コストが低く、かつ、マウスおよびトラックパッドなどの入力デバイスと自然に統合する3Dモデリング操作を提供する。ユーザは深度カメラ付きのスマートフォンを台座として使用する。すなわち、ハンドジェスチャによって3Dモデリングを行い、また、スマートフォンを回転させることによって、オブジェクトに対する視点を変更する。本システムは、PCで制作物を閲覧できるため、モバイルデバイス単体のAR空間における3Dスケッチシステムと比較して、操作領域を拡張できる。本研究により、1人または複数の初心者および上級者が3Dオブジェクトのラピッドプロトタイプを行うことができる。

本システムでは3Dモデリングにおける重要な操作として、ラピッドプロトタイピング、回転に基づくモデリング、既存オブジェクトの修正、協調作業を提供する。これらの操作をスマートフォンおよびPCのみを用いて実現するこ

¹ 筑波大学 情報理工学位プログラム

² 筑波大学 システム情報系

^{a)} takeyama@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

とにより、3Dモデリングの操作性を向上させることを目指す。このシステムによって、特にエンジニア、デザイナーおよびアーティストなどの初心者を含む複数人が、3次元形状のブレインストーミングやラピッドプロトタイピングを行う際に協調作業を促進することにより、新たなアイデアの創出を支援することが期待される。我々は本システムの基本機能を評価し、初心者がどの程度の時間で3Dモデルのラピッドプロトタイプを行うことができるかを検証する。また、ユーザビリティについても評価し、システムの改善点を明らかにする。

2. 関連研究

本節にて本システムが実現されるアプリケーションの背景となる関連研究を紹介することにより、本研究の位置付けを明らかにする。

2.1 3Dモデリング

現在、3Dモデリングには多様なソフトウェアが利用されている。Blender^{*1}、Zbrush^{*2}、およびMaya^{*3}は、その代表例としてそれぞれが独自の機能と操作性を持つ。これらのソフトウェアはプロフェッショナルな制作に不可欠なツールであるが、その複雑さは初心者にとって大きな障壁となっている。また、これらのツールは初心者だけでなく上級者にとっても、ラピッドプロトタイプを行う際には適していない。さらに、PCにおける3Dモデリングはマウス操作を前提としているため、複数人が同時に3Dモデリングを行うことは困難である。これは、特にブレインストーミングやプロトタイピングの段階での3Dモデリングを行う際には大きな問題となる。本研究では、深度カメラ付きスマートフォンを用いてPCにおける3Dモデリングを補完することにより、上記の問題を解決することを目指す。

2.2 3Dスケッチ

3Dスケッチは、3Dモデリングの初心者にとっても直感的な操作を実現するための3Dモデリング手法として注目されている。VR技術の進展により、Tilt Brush^{*4}、およびGravity Sketch^{*5}などのアプリケーションが登場し、ユーザはVR空間内で3次元の絵を描くことができるようになった。これらのツールは、3Dモデリングの初心者にとっても学習コストが低い。さらに、HandPainter [2]、VRSketchIn [3]、およびLeeら [4]などの研究は、VRおよびPCにおける3Dスケッチの操作性を向上させる新たなインタラクション手法を提案している。しかし、これらの手法はHMDを用いるため、携帯性が低く、装着が必要で

あり、かつ、同じ場所で同時に複数人が3Dスケッチを行うことが困難であるという問題がある。Mobi3DSketch [5]、Just a Line^{*6}は、モバイルデバイスを用いたAR空間における3Dスケッチのためのアプリケーションである。HMDによるVRと比較して、モバイルデバイスによるARは携帯性が高いため、3Dスケッチを行う際には適している。しかし、モバイルデバイス単体のAR空間における3Dスケッチは小さな2Dディスプレイの限られた視覚情報による操作であるため、操作領域が限られる。Portalware [1]は、スマートフォン単体での限られた視覚情報を補完するために、デュアルディスプレイを用いた3Dスケッチシステムを提案している。Teddy [6]は、3Dモデリングのためのスケッチベースのシステムであるが、2Dディスプレイ上における操作のため、3Dモデリングとしては限界がある。本研究は、スマートフォン前面の深度カメラを用いて、粘土のような太さのある3Dスケッチを行うことによって、3Dモデリングの初心者でも簡単に3Dモデルを作成できるシステムを提案する。また、スマートフォンを台座として用い、PCで制作物を閲覧できるため、モバイルデバイス単体のAR空間における3Dスケッチと比較して操作領域を拡張できる。

2.3 外部コントローラを用いた3次元インタラクション

PC上での3Dモデリング操作を補完するための外部コントローラとして、3Dマウスが用いられる。3DConnexionのSpaceMouse^{*7}は、3D空間での精密な操作を可能にするデバイスである。しかし、PCの作業空間において、追加のデバイスが必要であり、さらにそのハードウェアの追加コストがかかるため、初心者にとっては敷居が高い。また、本デバイスを用いたとしても、初心者にとっては3Dモデリングは依然として学習コストが高く、また、複数人が同時に3Dモデリングを行うことは困難である。VRまたはAR分野では、HnadyCast [7]、HoloTouch [8]およびTiltcasting [9]などが提案されている。Hursaleら [10]は、スマートフォンの加速度センサを使用して空中でジェスチャを認識するシステムを提案している。Büschelら [11]は、3Dデータ空間の探索をサポートするためのスマートフォンを用いたパンおよびズームの手法を調査している。In-Depth Mouse [12]は、PCにおけるマウスをVR空間に拡張するためのシステムである。本研究は、外部コントローラとして深度カメラ付きのスマートフォンを用いることによりPC操作における3Dモデリングの操作性を向上させることを目指す。

2.4 3次元インタラクションの協調作業支援

Wellsら [13]は同じ場所におけるAR協調作業支援に適

*1 <https://www.blender.org/>

*2 <https://www.maxon.net/en/zbrush>

*3 <https://www.autodesk.com/products/maya/overview>

*4 <https://www.tiltbrush.com/>

*5 <https://www.gravitysketch.com/>

*6 <https://experiments.withgoogle.com/justaline>

*7 <https://3dconnexion.com/jp/spacemouse/>

したデバイス構成およびサイズを調査した。VRGit [14] は、VR 空間での協調作業を支援するツールである。しかし、同時に複数のユーザが 3D モデルを編集することはできない。Mixer*⁸ は、Blender アドオンとして協調作業機能が提供されているため、Blender の操作を熟知しているユーザにとっては有用であるが、初心者にとってはハードルが高い。本研究では、スマートフォンの深度カメラを用いて、初心者を含む複数のユーザが同時に 3D モデルを編集できるシステムを提案する。

3. PhonePedestal

本研究では、スマートフォンを台座として用いた 3D モデリングシステム PhonePedestal を実装した。本システムは、スマートフォンを PC に接続し、Blender における 3D モデリングを補完することにより、以下の基本機能を提供する。

回転 ユーザはスマートフォンを回転させることで、オブジェクトに対する視点を変更できる (図 1)。回転は、スマートフォンを手を持つ方法、回転台座に乗せる方法、および机に置く方法の 3 通りがある。スマートフォンを手を持つ場合は、ロール、ピッチ、ヨーの 3 軸の回転が可能であるが、長時間の操作には疲労が生じる。机に置いて回転する場合および回転台座に乗せて回転する場合は、1 軸の回転が可能である。これらの持ち方を瞬時に切り替えることができる。スマートフォンの回転による視点の回転によって、容易な全体像の把握、および、回転に基づくモデリングが可能となる。

ハンドジェスチャ 学習コストが低く、かつラピッドプロトタイプに適した 3D モデリング操作を実現するために、ハンドジェスチャを用いる。本システムでは、スマートフォン前面の深度カメラを用いて取得されたハンドジェスチャを認識することにより、初心者でも簡単に 3 次元形状を作成できる。ユーザはスマートフォン前面の空間にて、人差し指と親指のピンチジェスチャにより、厚みのある 3 次元の線を描くことができる。また、ユーザはピンチジェスチャを行っていない状態で手を動かすことにより、描画済みの線を一部削除できる (図 2)。

フィードバック ユーザは本システムを通じて、視覚および触覚フィードバックを得ることができる。オブジェクトを削除する際には、スマートフォンから振動フィードバックを得ることができる (図 2b)。また、深度カメラに写った人差し指先端に対応する球体を Blender 上に描画する。この視覚的なフィードバックによって、描画オブジェクトに対する人差し指の位置を把握で

きる。



図 1 スマートフォンの回転の種類。(a) スマートフォンを手を持つ方法、(b) 回転台座に乗せる方法、(c) 机に置く方法。

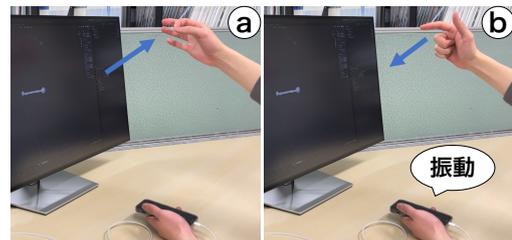


図 2 ハンドジェスチャの種類。(a) ユーザが人差し指の先端と親指の先端を接触させることにより粘土のようなオブジェクトを出力する。(b) ユーザがそれ以外の状態でオブジェクトに触れることにより一部を削除し、スマートフォンに振動を与える。

本システムを用いることによりユーザは、ラピッドプロトタイプ作成、回転に基づくモデリング、既存オブジェクトの修正、協調作業を行うことができる。

3.1 ラピッドプロトタイプの作成

ユーザはハンドジェスチャをスマートフォン前面の空間にて行うことにより、3次元の自由ストロークを描くことができる。ラピッドプロトタイプ作成では、上記の基本機能を用いて 3D モデリングを行うことができる。図 3は、ユーザがスマートフォンを机に置き、空中でハンドジェスチャを行うことにより、3D モデリングのラピッドプロトタイプを作成している様子を示している。

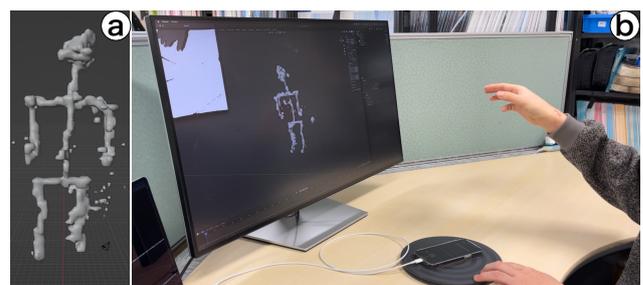


図 3 ラピッドプロトタイプの作成。(a) 作例。(b) ラピッドプロトタイプを作成する様子。

*⁸ <https://ubisoft-mixer.readthedocs.io/en/latest/>

3.2 回転に基づくモデリング

ユーザはスマートフォンを台座として使用することにより回転に基づくモデリングができる。図4は、ユーザが手を真上方向に移動させ、スマートフォンを乗せた台座を回転させることにより陶器をモデリングする様子を示している。図5は、台座を回転させつつ、人差し指先端を斜め上方向に移動させることにより木の枝をモデリングする様子を示している。制作オブジェクトは可変であるため、空中での仮想オブジェクトを割り当てる。一方で、視点は不変であるため、スマートフォンという現実のオブジェクトを割り当てる。

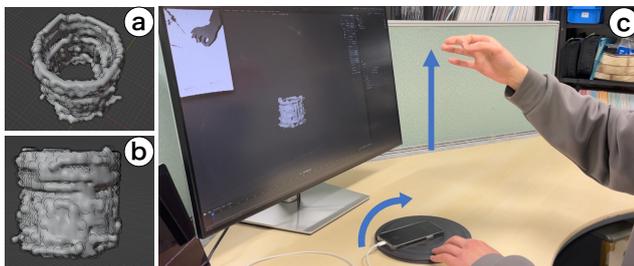


図4 回転に基づくモデリングとして作成した陶器およびその時のユーザ。(a,b) 作例。(c) 回転に基づくモデリングを行う様子。

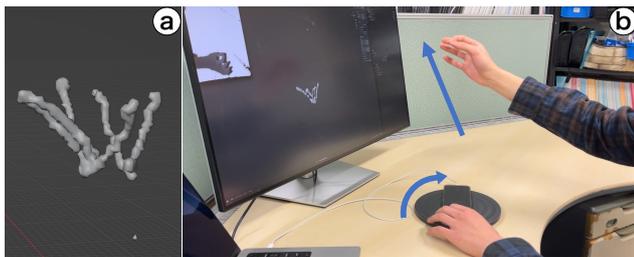


図5 回転に基づくモデリングとして作成した木の枝およびその時のユーザ。(a) 作例。(b) 回転に基づくモデリングを行う様子。

3.3 既存オブジェクトの修正

本システムを用いることによって、ユーザは既存の3Dモデルを修正できる。例えば、アノテーションを行うことができる。図6は、キャラクター (Blender Suzanne) に対して、口、耳、後頭部にアノテーションが行われている様子を示している。

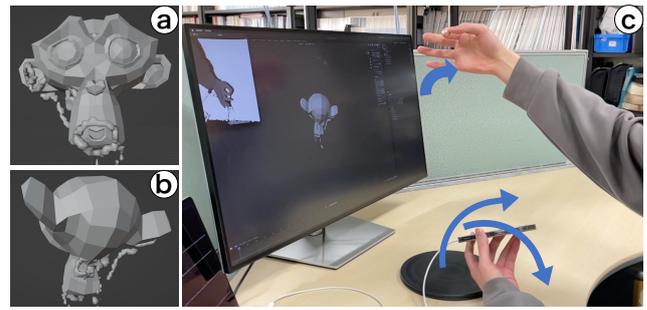


図6 既存オブジェクトへのアノテーション。(a,b) 作例。(c) 既存オブジェクトへのアノテーションを行う様子。

また、ユーザは既存の3Dモデルに対して、新たな3次元形状を追加できる。図7は、既存のキャラクター (Blender Suzanne) に対して、角およびピアスが追加され、ほお付近の形状が変更されている様子を示している。



図7 既存オブジェクトの修正。(a) 作例。(b) 既存オブジェクトに対して新たな3次元形状を追加する様子。

3.4 協調作業

本システムは深度カメラに写った複数の手のトラッキングを行うことにより、複数人が協調作業を行うことを可能とする。図8は、複数のユーザがモデリング済みのキャラクターに対して共同で新たな3次元形状を追加する様子を示している。具体的には、頭部に角、およびピアスが追加され、胴体が新しく作成されている。複数人が同時にスマートフォン前面の空間にてハンドジェスチャを行うことで、複数の3次元ストロークを描くことができる。また、一人がマウス、他の人がスマートフォンを用いた協調作業も可能である。



図8 協調作業。(a) 作例。(b) 2人で協調作業を行う様子。

4. システム実装

本節では、システムの実装に関して述べる。本システムの全体構成は、図9に示されている。本システムは、深度カメラ付きのスマートフォンを用いてIMUセンサのデータ及びRGBD画像を取得し、それらのデータをPCへリアルタイムで転送する。今回は、深度カメラ付きのスマートフォンとしてiPhone 12 miniを用いた。RGBD画像は、iPhone 12 miniに搭載されたTrueDepthカメラを通じて取得される。PC上のBlenderにて転送されたデータを基に、手の検出・追跡および3次元空間における線や回転の描画を行う処理が実施される。

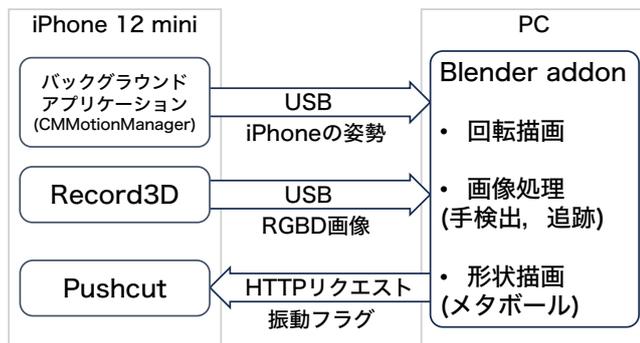


図9 システムの構成図

4.1 データの取得方法

本システムでは、スマートフォンを用いてIMUセンサのデータ及びRGBD画像を取得する。

スマートフォンに搭載されているIMUセンサから、スマートフォンの姿勢をクォータニオンとして取得する。データの取得はCMMotionManagerが使用され、取得したデータはリアルタイムでPCへ送信される。また、スマートフォンのTrueDepthカメラを使用してRGBD画像を取得する。取得したRGBDデータは、Record3D^{*9}を介してリアルタイムでPCに送信される。データ転送には、PC上にてRecord3DのSDK^{*10}およびpymobiledevice3^{*11}を用いることにより、スマートフォンからのデータ取得を実現している。

4.2 画像処理による手の検出および追跡

取得したRGBD画像を利用して、親指先端の検出、および人差し指先端の検出ならびに追跡を行う。検出はMediaPipe^{*12}を用いて実施され、追跡は前フレームの手の位置に最も近い手を選択する方法で実施される。得られたピクセル座標は、深度画像とカメラパラメータを利用して3次元空間の世界座標系へ変換される。変換後、本システム

^{*9} <https://record3d.app/>

^{*10} <https://github.com/marek-simonik/record3d>

^{*11} <https://github.com/doron288/pymobiledevice3>

^{*12} <https://developers.google.com/mediapipe>

は人差し指先端と親指先端の距離を基にピンチジェスチャの有無を判断する。ピンチジェスチャとして認識する距離の閾値は、5cmとした。最後に、画像処理関数からは1つの手毎に人差し指先端の3次元座標、ピンチジェスチャの状態、及び手の追跡IDが戻り値として返される。

4.3 モデリング操作

粘土のようなモデリング操作は、メタボールを格子点にマッピングすることで実現される。フレームごとに取得される人差し指先端の3次元座標を基に、線形補間を行いながら、メタボールを格子点上に配置する。

さらに、ユーザはスマートフォン内蔵のIMUセンサを活用して、デバイスの物理的な回転により描画オブジェクトの回転操作を行うことが可能となっている。オブジェクトに対する視点の位置は、起動時にスマートフォンが置いてあると仮定しているxy平面から10°の角度で設定される。この角度はおおよそ現実世界におけるスマートフォンとユーザの視線の角度に相当する。

4.4 振動フィードバック

オブジェクトに触れた際にPCからPushcut^{*13}へHTTPリクエストを送信することにより、スマートフォンの振動を制御する。

5. 実験

我々は、3Dモデリング初心者が本システムを用いて、3Dモデルのラピッドプロトタイピングを作成する際の基本的な機能およびモデリングプロセスを評価するための実験を行った。

5.1 参加者

本実験では、研究室内の22-23歳(男性4名)の大学院生および大学生(P1-P4)を対象に、本システムを用いた3Dモデリングを行う実験を行った。参加者は、3Dモデリングソフトウェアを全く使用しない、または、年に数回程度の使用経験がある初心者である。

5.2 実験手順

実験は、「HCI」という文字列(以降、「HCI」)、および木の目的の物体のモデリングセッション、ならびに自由なモデリングセッションの2つのセッションにより構成された。実験参加者は、それぞれのセッションにおいて、本システムを用いた3Dモデリングを行った。実験中、我々はモデリングが完成するまでの時間を計測した。実験終了後には、SUSおよびモデリングプロセスについてのアンケートを行った。

^{*13} <https://www.pushcut.io/>

5.3 実験結果

本節では、実験の結果について述べる。

5.3.1 目的の物体のモデリングセッション

目的の物体のモデリングセッションでは、実験参加者は、「HCI」、および木のモデリングを行った。実験参加者がモデリングした「HCI」の作例、およびモデリングに要した時間を図 10 に示す。また、実験参加者がモデリングした木の作例、およびモデリングに要した時間を図 11 に示す。

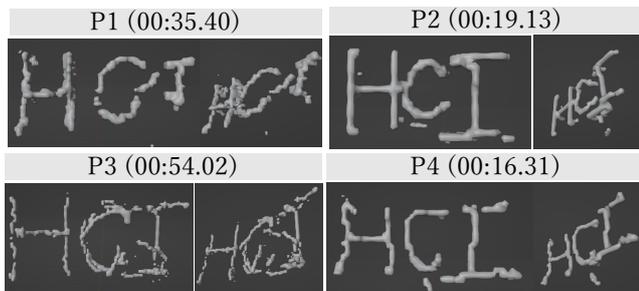


図 10 実験参加者がモデリングした「HCI」の作例およびモデリングに要した時間 (m:s)

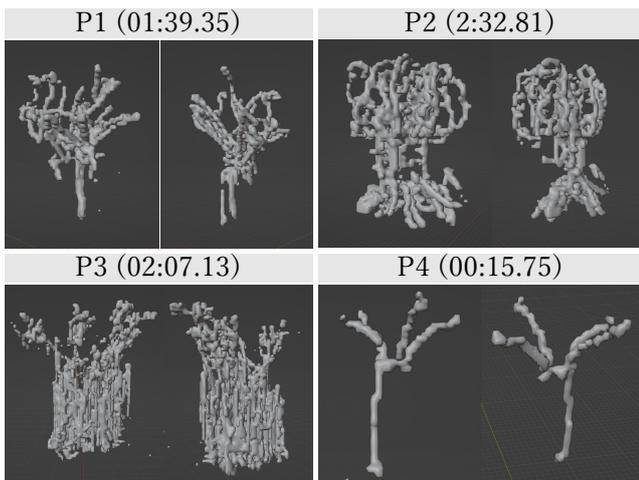


図 11 実験参加者がモデリングした木の作例およびモデリングに要した時間 (m:s)

「HCI」および木のモデリングに要した時間の結果を図 12 に示す。図 12 に示す通り、「HCI」のモデリングに要した時間は、平均 31.22 秒 (標準偏差は 17.38 秒) であった。また、木のモデリングに要した時間は、平均 1 分 38.76 秒 (標準偏差は 59.49 秒) であった。

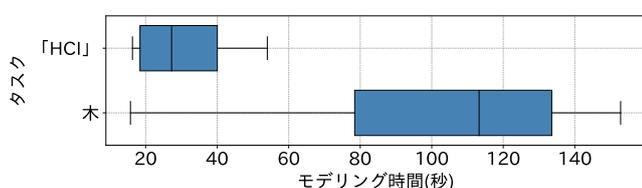


図 12 モデリングに要した時間の結果

5.3.2 自由なモデリングセッション

自由なモデリングセッションにおいて、実験参加者は自由な 3 次元形状のモデリングを行った。実験参加者がモデリングした作例、およびモデリングに要した時間を図 13 に示す。

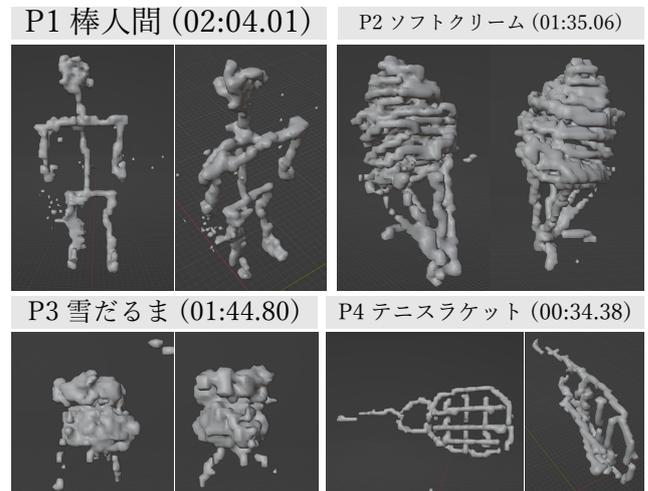


図 13 実験参加者がモデリングした作例およびモデリングに要した時間 (m:s)

5.3.3 アンケート結果

実験終了後に、実験参加者に対して SUS およびモデリングプロセスについてのアンケートを行った。SUS の各質問に対する回答を図 14 に示す。

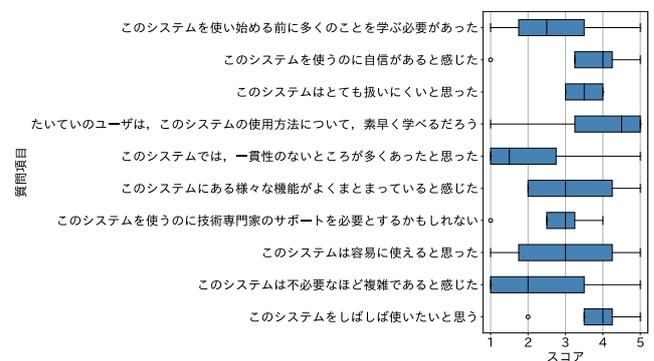


図 14 参加者による 5 段階のリッカート尺度による SUS の各質問に対する回答

各参加者の SUS スコアを図 15 に示す。SUS スコアは、平均 58.75 (標準偏差=35.50) であった。

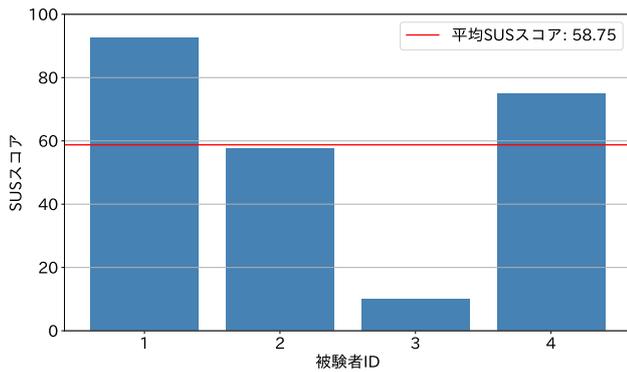


図 15 各参加者の SUS スコア

5.3.4 インタビュー結果

回転、ハンドジェスチャ、フィードバックおよびモデリングプロセスに関するインタビューの結果を以下に示す。

回転 「完成した後に回転することが多かった。(P1)」、「台座をよく使った。手に持って回転させることは少なかった。奥行き確認のために回転を使った。(P2)」、「回転機能を使ったが、ハンドジェスチャに関して意識することが多かったため、あまり使えなかった。(P3)」、「視点を回転させるときに回転を行った。回転しつつ、モデリングを行うことはなかった。また、手に持って回転させることはなかった。(P4)」

ハンドジェスチャ 「総じて使いやすかったが、ピンチジェスチャをやめた時オブジェクトがすぐに消えてしまうことがあったので、一定間隔があるといいと感じた。(P1)」、「描こうとしていないのに描いてしまうことがあった。(P2)」、「描画モードのつもりが削除モードになっていることがあった。(P3)」、「ピンチジェスチャは使いやすいと感じた。一部除去モードは重ねているだけで消えてしまうので、注意が必要だと感じた。(P4)」

フィードバック 「一定間隔で振動が来るのがいいと感じた。振動自体はなくてもいいと感じた。(P1)」、「視覚的に一部除去されていることがわかるので、振動がなくても問題ないと感じた。(P3, P4)」

モデリングプロセス 「明らかに操作しやすいと感じた。Blender のショートカットキーを覚える必要がなく、自分の思ったものを描画できた。(P1)」、「Blender よりも本システムの方がカジュアルに使えると感じた。頭の中にあるものを軽く描画できる。精密なものを描画するには Blender の方がいいと感じた。(P2)」、「慣れるまでに時間がかかった。Blender に元々用意されているオブジェクトは Blender の方が使いやすいと感じた。雲などの自由な形状を描画するには本システムの方がいいと感じた。(P3)」、「Blender と比較して3次元の自由ストロークが描けるのが良いと感じた。思いついたものをすぐに描画できるのが良いと感じた。

(P4)」

6. 議論および今後の予定

目的の物体のモデリングセッションでは、実験参加者は本システムを用いて、「HCI」を平均 31.22 秒で、木を平均 1 分 38.76 秒でモデリングできた。これは、初心者でも短時間で 3D モデリングを行うことができることを示している。自由なモデリングセッションでは、実験参加者が自由な発想で 3D モデリングを行うことができた。また、ユーザ毎のモデリング時間にはばらつきがあるものの、初心者でも約 3 分以内で 3 次元の自由ストロークを伴う 3D モデリングを行うことができることが示された。これは、本システムが、様々な 3D モデルのラピッドプロトタイピングに適していることを示している。

本システムの SUS スコアは平均 58.75 であったことから、システムの改善の余地があると考えられる。また、標準偏差が 35.50 であることから、参加者間においてユーザビリティの評価に大きなばらつきがあることがわかる。このことから、一部の人にとっては使いやすいが、一部の人にとっては使いにくいということが示された。

インタビューから、回転、ハンドジェスチャおよびフィードバックの機能に対して具体的な意見が得られた。特に、ハンドジェスチャに関しては、予期せぬ動作による問題が指摘されたため、システムの改善が必要であることが示された。具体的には、ピンチジェスチャとして認識される親指先端および人差し指先端の距離閾値の調整をユーザが行えるようにする機能が求められる。また、振動機能については、視覚的なフィードバックだけで十分との意見があったため、ユーザの好みに応じたカスタマイズ機能の提供も考慮すべきである。また、本システムは、線としての 3D モデリングに特化している。そのため、立体的な 3 次元形状を素早く作成する機能の追加が求められる。

以上のことから、本システムは 3D モデリング初心者にとって特に有用なツールであるため、初心者でも短時間で 3D モデリングを行うことができると考えられる。しかし、ユーザビリティに関しては改善の余地があり、特に不必要な機能および誤操作の防止に関する改善が必要である。今後、ユーザからのフィードバックをもとに、システムの操作性、機能性、ユーザインタフェースの改善を行うことにより広範なユーザに受け入れられるシステムの開発を行う。

7. 結論

本研究では、スマートフォンを台座として用いた 3D モデリングシステム PhonePedestal を実装した。本システムは、回転、ハンドジェスチャ、フィードバックの機能を提供する。これにより、初心者でも短時間で 3D モデリングを行うことができる。また、アプリケーションとして、ラピッドプロトタイプ作成、回転に基づくモデリング、既

存オブジェクトの修正および協調作業が実現される。

本研究では、ラピッドプロトタイプを行う際の基本的な機能およびモデリングプロセスを評価した。実験の結果として、ユーザ毎のモデリング時間にはばらつきがあるものの、初心者でも3分以内で3次元の自由ストロークを伴う3Dモデリングを行うことができることが示された。また、ユーザビリティに関しては改善の余地があり、特に不必要な機能の修正および誤操作の防止が必要であることが示された。今後、ユーザからのフィードバックをもとに、システムの操作性、機能性およびユーザインタフェースの改善を行い、広範なユーザに受け入れられるシステムの開発を行う。

参考文献

- [1] Qian, J., Young-Ng, M., Li, X., Cheung, A., Yang, F. and Huang, J.: Portalware: A Smartphone-Wearable Dual-Display System for Expanding the Free-Hand Interaction Region in Augmented Reality, *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '20, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–8 (online), DOI: 10.1145/3334480.3383079 (2020).
- [2] Jiang, Y., Zhang, C., Fu, H., Cannavò, A., Lamberti, F., Lau, H. Y. K. and Wang, W.: HandPainter - 3D Sketching in VR with Hand-Based Physical Proxy, *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–13 (online), DOI: 10.1145/3411764.3445302 (2021).
- [3] Drey, T., Gugenheimer, J., Karlbauer, J., Milo, M. and Rukzio, E.: VRSketchIn: Exploring the Design Space of Pen and Tablet Interaction for 3D Sketching in Virtual Reality, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–14 (online), DOI: 10.1145/3313831.3376628 (2020).
- [4] Lee, J. H., Ham, H.-G., Kim, M.-S. and Bae, S.-H.: 3D Sketching for Multi-Pose Products: An Interactive Showcase, *ACM SIGGRAPH 2020 Labs*, SIGGRAPH '20, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–2 (online), DOI: 10.1145/3388763.3407759 (2020).
- [5] Kwan, K. C. and Fu, H.: Mobi3DSketch: 3D Sketching in Mobile AR, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–11 (online), DOI: 10.1145/3290605.3300406 (2019).
- [6] Igarashi, T., Matsuoka, S. and Tanaka, H.: Teddy: A Sketching Interface for 3D Freeform Design, *Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '99, USA, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 409–416 (online), DOI: 10.1145/311535.311602 (1999).
- [7] Kari, M. and Holz, C.: HandyCast: Phone-based Bimanual Input for Virtual Reality in Mobile and Space-Constrained Settings via Pose-and-Touch Transfer, *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–15 (online), DOI: 10.1145/3544548.3580677 (2023).
- [8] Chulpongsatorn, N., Willett, W. and Suzuki, R.: Holo-Touch: Interacting with Mixed Reality Visualizations Through Smartphone Proxies, *Extended Abstracts of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, ACM, pp. 1–8 (online), DOI: 10.1145/3544549.3585738 (2023).
- [9] Pietroszek, K., Wallace, J. R. and Lank, E.: Tiltcasting: 3D Interaction on Large Displays using a Mobile Device, *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, UIST '15, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 57–62 (online), DOI: 10.1145/2807442.2807471 (2015).
- [10] Hursale, S., Makwana, H., Panchal, A., Bhakkad, C. and Vairagar, S.: Smartphone's Based Gesture Recognition in Air, *Proceedings of the 2015 International Conference on Advanced Research in Computer Science Engineering & Technology (ICARCSET 2015)*, ICARCSET '15, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–5 (online), DOI: 10.1145/2743065.2743114 (2015).
- [11] Büschel, W., Mitschick, A., Meyer, T. and Dachselt, R.: Investigating Smartphone-based Pan and Zoom in 3D Data Spaces in Augmented Reality, *Proceedings of the 21st International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–13 (online), DOI: 10.1145/3338286.3340113 (2019).
- [12] Zhou, Q., Fitzmaurice, G. and Anderson, F.: In-Depth Mouse: Integrating Desktop Mouse into Virtual Reality, *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '22, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–17 (online), DOI: 10.1145/3491102.3501884 (2022).
- [13] Wells, T., Potts, D. and Houben, S.: A Study into the Effect of Mobile Device Configurations on Co-Located Collaboration using AR, *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, Vol. 6, No. MHCI, pp. 1–23 (online), DOI: 10.1145/3546735 (2022).
- [14] Zhang, L., Agrawal, A., Oney, S. and Guo, A.: VR-Git: A Version Control System for Collaborative Content Creation in Virtual Reality, *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–14 (online), DOI: 10.1145/3544548.3581136 (2023).