芸術科学会論文誌 Vol. 21, No. 1, pp. 23 – 36 (2022)

Fab KUI : KUI とスマートフォン AR を用いた実空間における共同 3D モデリング手法の提案

菊池康太 [1)](学生会員)　尼岡利崇 [1)](正会員)

1) 明星大学大学院情報学研究科

Fab KUI : Proposal of Collaborative 3D Modeling Method in Real Space by using KUI and Smartphone AR

Kouta Kikuchi[1)]　**Toshitaka Amaoka**[1)]

1) Graduate School of Information Science, Meisei University

{19dj001@stu, amaoka@is}.meisei-u.ac.jp

概要

近年の 3D モデリング環境の動向として，ネットワークを通じて複数人での同時編集がサポートされ，オンラインや VR 空間でコミュニケーションを取りながら 3D モデリングを行うことが可能になってきている．しかし，実空間を共有しモデリングを行う場合では，ディスプレイの指向性についての考慮や複数の作業環境が必要となる．本研究では，実空間において複数人で単一のモデリングインタフェースを共有し，スマートフォン AR を用いて共同で 3D モデリングを可能にするモデリング手法，Fab KUI を提案する．提案手法では，影をインタフェースとして物体を操作する影ユーザーインタフェースの概念を応用し，影への操作から物体の 3 次元移動を可能にする事で，物体が移動した 3 次元的な軌跡から 3D モデルを生成し，ドローイングする様に 3D モデルを作成する事を可能とする．また，スマートフォン AR を用いて実空間に作成する 3D モデルを重畳表示させる事で，複数人で 3D モデルを観察する事が可能となる．本稿では，これら提案手法の実装方法について述べ，評価実験の結果からシステムの有効性を示す．

Abstract

As a recent trends in 3D modeling environments, they implement simultaneous editing through network by multiple people. Furthermore, multiple people are able to create 3D model with communicating online or in VR space by using these 3D modeling environments. On the other hand, in the case of modeling by collaborating with some users in real space, users need to share the display or multiple work environments are required. In this study, we propose FabKUI, a modeling method that enables multiple people to share a single interface in real space and collaborate on 3D modeling by using smartphone AR. In the proposed method, the concept of shadow user interface enables to control 3D movement of the entity by manipulation of shadows. And 3D models can be generated from 3D trajectories of the movement of the entity. Because of the application of KUI, FabKUI enable to create 3D models as if handwriting. In addition, by superimposing the 3D model generated in the real space using smartphone AR, it is possible for multiple people to view the 3D model. In this paper, we show the way of implementation of the proposed method and demonstrate the effectiveness of the system from the results of evaluation experiments.

1 はじめに

デジタルファブリケーションにおける電子工作やプログラミング，3D モデリングにおいて初学者にも扱いやすいツールや環境が増えてきている．Arduino や Raspberry Pi，micro:bit などの安価なマイコンボードは電子回路やプログラミングの教材としても使用されており，Pure Data や Touch Designer は，ノードを繋ぐ事で直感的に音や CG 制作を可能にする環境を提供している．また，Tinker CAD や Sketch UP は，3D モデリング初学者でもアイディアを形にできるユーザーインタフェースを提供している．さらに，クリエイティブコーディングという分野で代表的な開発環境に Processing があるが，公式サイト冒頭に “Processing is a flexible software sketchbook and a language for learning how to code within the context of the visual arts.” [1] という文章があるように，プログラミングをクリエイションに利用する上でスケッチを描くかのように簡単で直感的な開発環境を提供している．クリエイティブコーディングに代表される考え方によって提案されてきたこれら簡易的な機能や直感的な UI を提供するツールにより，専門知識を有していない人でもデジタルファブリケーションによって，ものつくりを楽しむ事が出来るようになってきたと言える．

また，近年のデジタルファブリケーションの動向として FabCafe や FabLab，ものつくり教室などで参加者が共同作業を通してものつくりを楽しむ機会が増えている．ものつくりの空間を共有する事で，参加者相互のディスカッションが可能となり，さらには，互いに交流することで新しいアイディアが生まれるきっかけを与えている．その結果，コラボレーション作品が生まれる可能性も高くなると考える．3D モデリング環境の TinkerCAD や Blender のアドオン Mixe では，ネットワークで繋がりリアルタイムで共同編集可能な機能が追加され，オンライン上で複数人により 1 つの作品を制作することが可能である．また，VR 空間内で共同モデリング可能なアプリケーション [2][3][4] も多数存在し，VR 空間にて空間や作品を共有しコミュニケーションを取りながら共同で 3D モデリングが可能になっている．このように VR 空間内での 3D モデル制作のための共同作業環境は整いつつあるが，実空間で 3D モデル制作の共同作業を行う場合，1 つの PC 画面をディスプレイやプロジェクタなどで共有するか各々の PC からオンライン上で共同制作するケースが想定される．1 つの PC 画面を共有する場合，ディスプレイモニタ形状や画面サイズによって指向性の制限があり，オンライン上でモデリング結果を共有する場合，複数の PC と開発環境が必要となり，対面的なコミュニケーションを阻害する一因となると考えられる．

そこで本研究では，実空間において複数人で単一のモデリングインタフェースを共有し，スマートフォン AR を用いて共同で 3D モデリングを可能にするモデリング手法，Fab KUI を提案する．また，本研究では著者らがこれまで提案してきた KUI(Kage User Interface) の概念 [5] を用いる事で，スケッチを描くような感覚で直感的に 3D モデルを作成可能なインタフェースを実装し，モデリング経験のない一般ユーザーでも容易に共同制作が可能になるシステムを提案する．そして，図 1 のように Fab KUI に 360 度フリーアクセス可能な設計とスマートフォン AR を用いる事で，対面にて複数人で 3D モデルを多角的に観察しながらコミュニケーションを図る事が可能になる．これによりディスプレイモニタを隔てずに対面でのコミュニケーションを阻害する事なく，共同での 3D モデリングが可能になる．本稿では，関連研究として従来の実世界指向モデリング研究との差異を示し，本研究の新規性について述べる．そして，Fab KUI が提供するモデリング手法の実装方法を述べ，評価実験で得られた結果を示す．

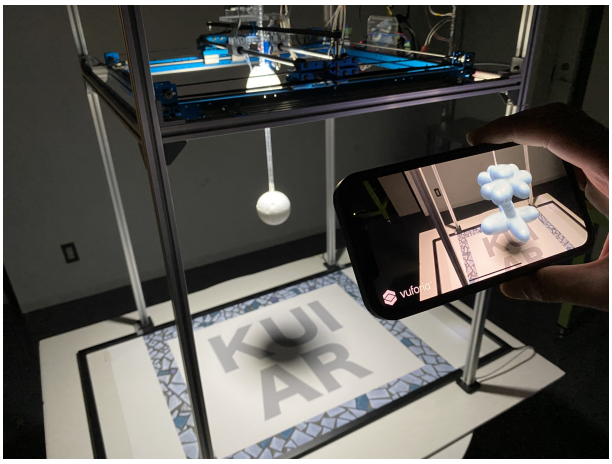

図 1: Fab KUI のシステムイメージ

2 Fab KUI について

2.1 これまでの KUI

KUI とは著者らがこれまで提案してきた影を操作する事で物体とのインタラクションを可能にするユーザーインタフェースの概念である [5]．物体が変化する事で影も変化するという，実世界の影と物体の物理的関係性を逆説的に捉え，影が変化する事で物体も変化する事象へと変換しインタフェースの概念として応用する．KUI では，影と同じ二次元平面であるスマートフォンのジェスチャ操作に準拠した操作方法を提供し，影をドラッグする事で物体を水平移動させ，影に対してピンチジェスチャを行う事で垂直移動させる．また，KUI を応用し影のメディア的性質を拡張する研究 [6][7] や，ディスプレイ空間で 3D ドローイングを可能にする応用手法 [8] を提案してきた．

2.2 Fab KUI の設計方針

著者らが考える Fab KUI のモデリング概念では，コミュニケーションを中心とした空間共有型のモデリング体験を提供するものである．例えるなら，実空間で 1 本のペンを共有しながら 1 枚の画用紙にアイディアスケッチを書いていくかの様に 3D モデルを作成できるモデリング手法である．インタフェースとなるペンを 1 本にすることで，試し書きをする際には必ずアイディアを共有するため，思考を共有する頻度も増え，より密接なコミュニケーションを図る事が可能になると考える．また，操作が交代制になることで作業分担できない分、互いの作業に意識が集中されることで，協力して一緒に作ることの意識が生まれるとも考える．

これらを実現するために，本提案手法は初心者でもアイディアをスケッチに描くかのように 3D モデルを作成できるインタフェースである点，そのインタフェースを共有しながら実空間でコミュニケーションを図りながらモデリングを行える点を考慮したインタフェースを設計する．Fab KUI では，KUI の影に対するジェスチャ操作によって物体を操作し，物体の移動した軌跡から 3D モデルを作成し AR を用いて実空間に重畳表示する事で，複数人が多視点から 3D モデルを観察しながらモデリングを可能とする手法を提案する．影に対するドラッグジェスチャとピンチジェスチャだけで，物体を三次元的に移動させる事が可能なため，従来のモデリング手法のような複雑なマウス操作やキーコマンドを用いずに 3D 形状を作成する事が可能である．また，AR によって複数視点から観察可能なため，マウスによるカメラ視点の変更も不要となる．そして，360 度フリーアクセス可能な設計にする事で，AR を用いて複数人がそれぞれの独立視点から 3D モデルの観察が可能となり，その場でディスカッションを行いながら直接モデルへアクセスする事が可能である．

3 関連研究

3.1 AR を用いたモデリング手法

HMD(Head Mounted Display) を用いる AR モデリングの手法として，五十嵐らの SituatedModeling[9] では AR マーカデバイスを用いて指定した位置に 3D モデルを配置可能とし，Patrick らが提案する DesignAR[10] では，HMD による AR 表示とペンタブレットやタッチジェスチャ入力によって 3D デザインを支援する．Huaishu らが提案する RoMA[11] では，HMD とコントローラを用いて空間上に仮想ワイヤーメッシュモデルを作成し，ロボットアームが 3D ペンを操作しモデルを出力する．これらの手法は HMD を用いることで，マウスでカメラを操作せずとも 3D モデルを多視点から観察することが可能である．しかし，専用のコントローラを必要とすることや，高度なモデリングを行うにはコントローラ操作を習得する必要がある．

スマートフォン AR を用いたモデリングの手法として，Huo らは実空間の物体のスケールに合わせた 3D モデルを空間に配置する Window-Shaping[12] を提案し，Kin らはスマートフォンのタッチ入力や加速度センサによる入力など複数入力によって空間に 3D モデルを生成する Mobi3DSketch[13] を提案している．スマートフォン AR を用いたモデリング手法では，従来のモデリングアプリケーションのようにディスプレイモニタに正対して作業せず，空間上に 3D モデルを重畳表示可能なため，作業空間上の制限が少なく，対面でのコミュニケーションを図る上で有意であり，共同でモデリングを行うには有効な手法であると考える．Fab KUI では，スマートフォン AR による複数人での 3D モデル観察を可能にする点に加え，複雑なコントローラ操作や高度なモデリングを行うためのインタフェースは用いず，KUI を使用した単一のインタフェースを共有する．それにより，ス

マートフォン AR 単体では，モデリング空間に各々自由に 3D モデルを作成する体験であるのに対し，Fab KUI では同じモデリング空間を共有し協力して 3D モデリングを行う体験を提案する．また，スマートフォン AR ではモデリングアプリケーションにおけるマウスによるカメラの操作がなく，空間に配置された 3D モデルを AR 越しに実際に観察できる．Fab KUI では，スマートフォン AR による 3D モデルの観察が可能な点に加え，ペン先となる実空間の物体がモデル生成位置を示す事で，スマートフォン画面と実空間の物体の 2 つの多次元的な情報から 3D モデルの生成位置を把握することができる．それらを複数人で 360 度多視点かつユーザーそれぞれの独立した視点から観察できる点で 3D モデルの空間的な位置の把握が容易になると考える．

3.2 共同作業可能な実世界指向モデリング

実世界指向インタフェースを用いるモデリング手法として，永井らは積木を積み上げる事で建築物の 3DCG を生成する手法として TSUMIKI CASTLE[14] を提案している．また，Anderson らは LEGO ブロックのようにブロックを組み合わせる事で建築物の 3DCG を生成する手法 [15] を提案している．さらに，北村らは連結式のブロックを用いてリアルタイムな 3 次元形状モデリングとインタラクション手法として Active Cube [16] を提案している．これらブロックを使った 3D モデリング手法では，ブロックを実空間で積み上げることで複数人による作業が可能となる．しかし，ブロックの形状は連結可能箇所が限られているため，曲線など，より自由度の高い形状を表現するためには多くのブロックを用いるか，専用のブロックが必要になる．

上下するピンマトリックスの高さを変更する事で 3DCG の形状を変形させる手法として，Follmer らの inFORM[17] や，Siu らの ShapeCAD[18] がある．また，石井らは砂場の形状をスキャンする事で 3D の地形を生成する Illuminating clay[19] を提案している．このような物体の高さを変更する事で 3D モデルを生成する手法では，入力インタフェース自体がディスプレイとしての役割を果たし，テーブルトップ形状になっていることから，複数人で囲んで作業する事が可能となり，CSCW 分野での活用も期待される．しかし，個々のピンがボクセルを表現し，インタフェース下部からピンが出ているため，空中にオブジェクトを配置するような表現や，二段構造のような表現は不向きであると考える．

これら共同作業可能な実世界指向モデリング手法に対し Fab KUI では，入力インタフェースがディスプレイとしても機能する事で複数人で出力結果を観察可能な点で共通している．加えて本研究では，単一のインタフェースによってドローイングのような操作を可能にする事で，曲線的な表現が容易となり，影に対する操作から物体は三次元移動が可能なため，空中にオブジェクトを配置する表現や二段構造の表現も可能となる．

4 提案手法

本研究では，影に対する操作から物体の三次元位置を変化させ，物体の移動した軌跡から 3D モデルを生成し，AR によって複数人で共同観察可能な 3D モデリング手法，Fab KUI を提案する．本章では，Fab KUI のシステムについて影から物体を操作し 3D モデルを生成する KUI モデリングシステムと，KUI モデリングシステムの操作方法，生成された 3D モデルの AR 表示を行う KUI-AR システム に分けて述べる．図 2 に提案手法のシステム構成図を示す．

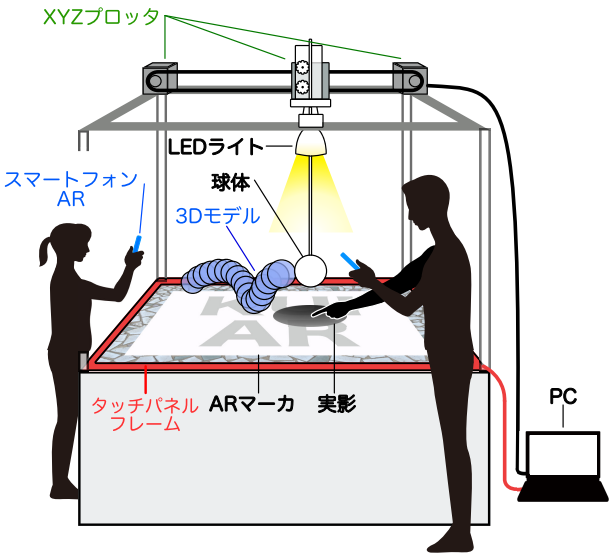

図 2: システム構成図

4.1 KUI モデリングシステムの概要

KUI モデリングシステムでは主に，影へのタッチ検出とジェスチャ判定，ジェスチャによる物体の移動，物体移動を用いた 3D モデル生成を行う．影へのタッチ検出にはタッチパネルフレームを使用し，フレーム内に影を

投影させる事で，影に対するマルチタッチジェスチャを検出可能にする．図 2 のように操作面となるテーブル上にタッチパネルフレームを配置し，その上部に影を生成する光源と光を遮蔽する球形状の物体 (以降，球体とする) を垂直かつ同一線上に配置する．これにより，ユーザーの影で球体の影を隠す事なく操作が可能となり，どの方向からでも同じ形状の影を操作する事が可能になる．影の範囲と指の当たり判定は，あらかじめ影の大きさを計測し，仮想の影領域としてプログラム内に設定し，その範囲内にタッチパネルフレームで検出された指の座標が入っていれば，ユーザーの操作を受け付け，指の本数によってジェスチャの識別を行う．

ジェスチャによる球体移動は，タッチパネルフレームにて検出された指の位置とジェスチャの種類によって球体の 3 次元位置を変化させる．球体の 3 次元位置の移動を可能にするため，XY プロッターとラックアンドピニオン方式の垂直移動機構を組み合わせ XYZ プロッターを制作する．図 2 のように球体と光源を垂直に連なる設計にする事で，垂直の位置関係を保ったまま移動が可能となり，インタフェースとなる影の大きさや形状を一定に保ったまま変化させる事ができる．

3D モデルの生成は，実際の操作空間を 3D 空間に再現し，球体と同形状，同スケールの 3D オブジェクトを実空間の球体と同じ位置になるように 3D 空間に配置する．球体の移動と連動し，3D オブジェクトも移動させ，移動した位置に 3D オブジェクトと同様の 3D モデルを生成する事で球体の移動した軌跡を 3D 空間に 3D モデルとして再現する．ユーザーの操作終了時に，生成された 3D モデルを STL 形式で書き出す事で，球体の軌跡の 3D モデルを出力する事が可能となる．

4.2 提案手法の操作方法

提案手法の操作方法として，これまで提案してきた KUI の応用システム [6][8] に準拠し，球体の水平方向移動には，図 3A のように一本指でのドラッグジェスチャを，そして垂直方向の移動には，図 3B のような二本指でのピンチイン・ピンチアウトジェスチャを採用する．また，図 3C のようにドラッグとピンチジェスチャを同時に行う事で，垂直移動と水平移動を同時に実行可能とし，図 3D のように，三本指でのドラッグジェスチャとピンチジェスチャを 3D モデルを生成せずに球体を移動させる操作として採用する．これらの操作により，片手による影へのドローイングのようなスムーズな操作から球体の三次元移動を可能にし，その球体の移動した軌跡によって 3D モデルを作成可能にする．片手操作を採用する事で，もう片方の手でスマートフォンを覗きながら操作が可能となり，KUI を操作しながら生成される 3 D モデルを確認する事ができる．

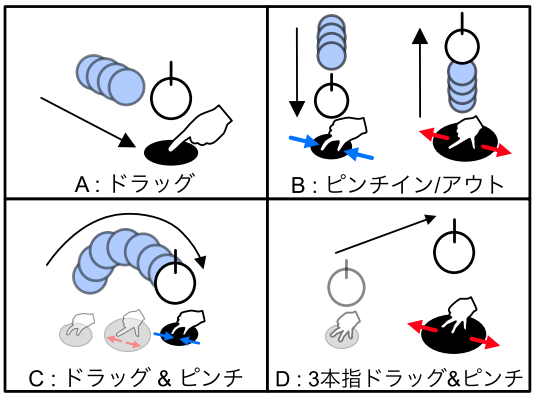

図 3: 4 つのジェスチャ操作

4.3 KUI-AR システムの概要

KUI-AR システムでは，スマートフォンとマーカ型 AR を用いて，KUI モデリングシステムによって 3D 空間に生成される 3D オブジェクトを実空間に重畳表示させる．操作面となるタッチパネルフレーム枠内に AR マーカを配置し，影への操作によって生成される 3D オブジェクトをスマートフォンに写る AR マーカ上に重畳表示させる．また，実空間における球体の移動可能範囲と 3D オブジェクトを重畳させる AR 空間の位置やスケールを合わせる事により，AR 表示上では球体が動いた位置に 3D オブジェクトが生成される．本手法の構造は図 2 のように操作面となる AR マーカを中心に開けた設計にする事で，ユーザの立ち位置に関わらず AR による 3D オブジェクトの観察と影への操作が可能になり，スマートフォンを複数台用意する事で，実空間における複数人同時観察も可能となる．

5 実装

本章では，図 4 に示す Fab KUI の実装方法について，KUI モデリングシステムと KUI-AR システム に分けて述べ，2 つのシステムを統合させた動作の様子を示す．

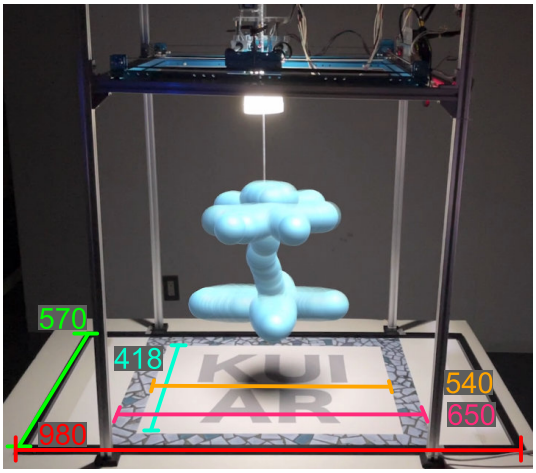

図 4: 実装した Fab KUI　(mm)

5.1　KUI モデリングシステムの実装

タッチパネルフレーム (Zhanchu Technology 社) は PC と USB 接続し，TUIO(Tangible User Interface Objects) 通信 [20] にて指の座標を最大 10 点まで取得することが出来る．図 5 のようにメインプログラム内にあらかじめ仮想の影領域を設定し，領域内部で検出された指のジェスチャによって影領域の位置や大きさを変化させる．メインプログラムは C++ のフレームワークである openFrameworks(ver.0.11.0) を使用する．

影領域の位置変更には指の中心座標の移動量を用いるため，図 5 左のように指が二本以上検出される場合は，図 5 右のように指同士の中心座標 (図 5 右の center) の移動量を位置変更に用いる．影領域の位置や大きさが変更されると共に，実空間の球体の位置も変更するために XYZ プロッタを動作させる．XYZ プロッタは，図 6 のように XY プロッタの中央にラックアンドピニオン方式の垂直 (Z 軸) 移動機構を取り付け制作する．XYZ プロッタは，各軸にステッピングモータ (MakeBlock 社製-42BYG) とステッピングモータドライバ (MakeBlock 社製-A4988) を用意し，1 つの Arduino Uno マイコンボードでモータの回転方向やスピードを制御する．影領域の XY 座標は XYZ プロッタの XY 軸のモータ制御値に変換し，影領域の直径は Z 軸のモータ制御値に変換する．変換された XYZ 各軸のモータ制御値を PC から XYZ プロッタを制御する Arduino へシリアル通信にて送信し，Arduino から各軸のステッピングモータを動作させ，球体の移動を行う．

図 5: 影の判定領域

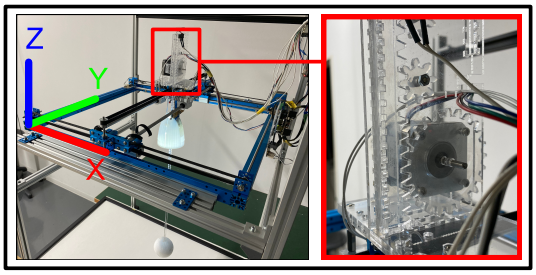

図 6: XYZ プロッタ

KUI モデリングシステムでは，ヘッド位置を推定するためのリミットスイッチが各軸に取付けられている．各モータにおける動作速度を表 1 に示す．計測ではプロッタのヘッドが端から端まで移動した際の速度を計測する．x 軸，y 軸におけるヘッドの移動はタイミングプーリとゴムベルトによって移動を行い，z 軸ではラックアンドピニオン方式によって移動を行うため速度差が生まれている．

表 1: 各モータの動作速度

	x 軸	y 軸	z 軸
距離 (mm)	380	320	300
時間 (s)	1.75	1.49	0.54
速度 (mm/s)	216.08	216.89	545.85

5.2　KUI-AR システムの実装

球体の移動によって生成される 3D オブジェクトを AR を用いて実空間に重畳表示させる．生成される 3D オブジェクトの座標を PC 側のプログラムから，OSC(Open Sound Control) 通信にて AR で使用するスマートフォンへ WiFi 経由で送信する．スマートフォ

ンで受信した座標を AR マーカ上の座標に変換し，3D オブジェクトを重畳表示させる際に実空間の球体の位置と一致させる．AR 用のスマートフォンアプリケーションは Unity 3D(ver.2019.4.20f1) と Vuforia Engine AR(ver.8.1.12) を用いて実装する．実機への書き出しは iOS または Android OS にて書き出し可能であるが，AR に使用するスマートフォンは画面が大きく片手で持てる大きさであることから，iPhone11 Pro と iPhone12 Pro Max を実機として使用する．AR 用のマーカは図 4 のように，操作面となる中央の領域は影が視認しやすいようにシンプルなデザインを採用する．また，球体の移動可能範囲がタッチパネルフレームの操作可能範囲より小さいため，操作が行われない領域には特徴量の多い画像を使用し，影の視認性とマーカ検出精度を上げるデザインを採用する．

5.3 動作実験の様子

実際に制作したシステムを動作させ，意図した 3D モデルを生成できるか動作実験を行なった．3D モデリング中のスマートフォン画面をキャプチャした様子を図 7 に示す．また，著者らが実際にモデリングした 3D モデルと 3D プリンタで印刷した結果を図 8 に示す．図 8 のように立体形状や，平面的な形状，キャラクタや文字など意図した形状をモデリングする事が可能である．また，図 9 にスマートフォンを複数台使用した共同制作中の様子を示す．従来のディスプレイに正対してモデリングを行う手法とは異なり，Fab KUI の 360 度自由にアクセスできる設計により，共同制作者同士が異なる位置に移動しても AR を用いる事で中央のモデルを同時に観察可能となり，アイディアを共有しながら 3D モデリングを行う事が可能となる．

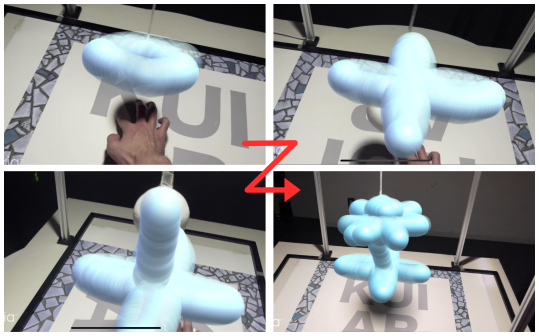

図 7: 3D モデル作成中の様子

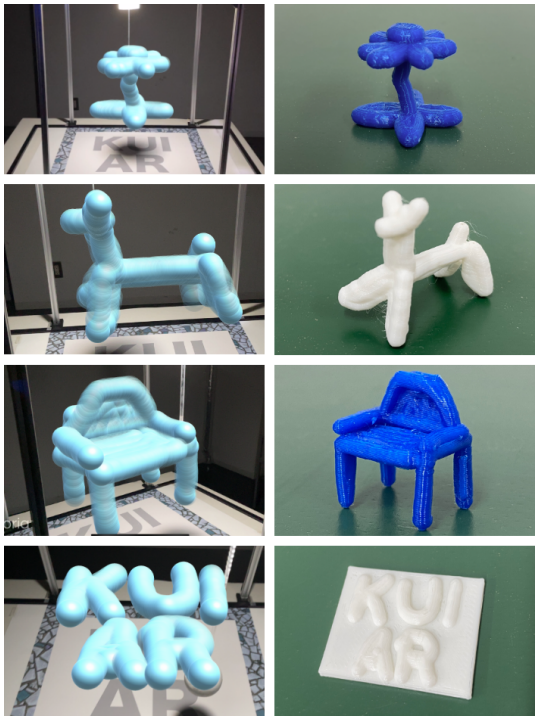

図 8: 作成した 3D モデルと 3D プリントの結果

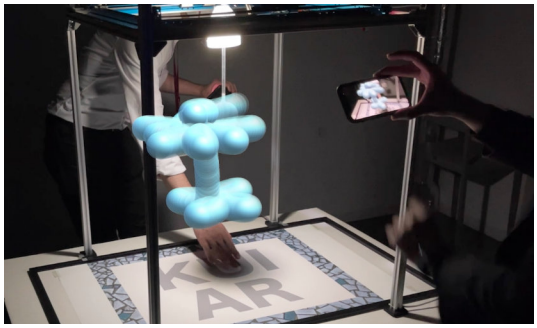

図 9: スマートフォン画面のキャプチャ画像

6 評価実験

6.1 実験概要

Fab KUI の提案する 3D モデリング手法は，初心者でもアイディアをスケッチに描くかのように 3D モデルを作成できるインタフェースである点，そのインタフェースを共有しながら実空間でコミュニケーションを図りながらモデリングを行える点を設計方針としている．そこで本手法の操作特徴である，影と球体の動きを用いたインタフェース，360 度フリーアクセス可能な設計，AR による複数人での 3D モデル観察の 3 点から有効な効果が

得られるか評価を行う必要があると考える．本稿では，これら 3 つの特徴に対し，インタフェースの操作性，共同作業性，AR の視認性の 3 項目に分けてアンケートによるユーザー評価を行う．また，定量的なアンケート評価に加え，実験後にインタビュー形式による聞き取り調査を行い定性的な評価を得る．

評価方法として，2 人 1 組となり本手法を用いて共同で 3D モデリングを行なってもらう．まず初めに，被験者に対し KUI の操作や AR 表示について説明を行い，1 人ずつ操作練習を 5 分程度行なってもらう．AR 表示に使用するスマートフォンは 1 人に 1 台用意し，2 人同時に AR による観察ができるようにする．次に，2 人共同で自由制作を行なってもらい，完成後に評価アンケートの回答を行なってもらう．最後にインタビュー形式で意見や感想などのヒアリングを行い，その様子を撮影し会話から特徴的な意見を抽出する．明星大学にて情報学部の学生 (以下，情報系学生)14 名 (内 1 名は大学院生)，人文学部の学生 (以下，人文系学生)6 名 (内 1 名は大学院生) の計 20 名に協力してもらい，同じ学部生同士で 2 人 1 組のペアを作り計 10 ペアに対し評価実験を行なった．人文系学生を対象とした理由は，評価実験から得られたアンケートの回答データを評価者全体のデータと，人文系学生と情報系学生で比較したデータ，モデリング経験の有無で比較したデータに分けてグラフ化し評価するためである．モデリング経験の有無で比較することで経験の無い被験者でも操作を行うことができたかを評価し，人文系学生と情報系学生で回答データを比較する事で，普段から AR などの情報技術に触れる機会の多い被験者と，機会の少ない被験者間でも回答に差異が生まれるかを評価する．3D モデリング経験があるか調査した結果 20 名中 3 名がモデリング経験があり，これら 3 名は同ペアにならないように振り分けを行なった．

6.2 評価項目

インタフェースの操作性，共同作業性，AR の視認性を評価する項目を表 2，表 3，表 4 にそれぞれ示す．回答は中央値を無くすため 4 段階評価で行い，それぞれの質問に対し 1 が低評価，4 が高評価となるように回答を設定した．表 2 の項目は，インタフェースの操作性に関する評価であり，Q1，Q2 のようにインタフェースとなる影や，球体を意図して動かす事ができたか，言い換えると思い描いた位置に 3D オブジェクトを生成できたかを評価する．また，影から球体を移動させるという概念の理解度が操作に影響すると考え Q3 の項目を加えた．表 3 の項目は共同作業性として，360 度フリーアクセス可能な設計により、お互いに多角的に移動しモデルを観察し，情報の共有が行われたかを評価する．共同で制作する上で，意思の疎通や意見交換を行ったかを測るため Q3 を設定した．Q5 は 4 段階評価で行うが，それぞれ操作した場所を評価 1「常に同じ方向」，評価 4「別方向かつ複数箇所」として，360 度フリーアクセス可能な設計にが生かされたか評価を行う．表 4 の Q1 は，操作を行う際に AR の他にどこを見て操作を行っているか調査するために設定した．インタフェースとなる影はもちろん，実世界のカーソル的役割を持つ球体など，複数要素を確認しながら操作を行っていると予想される．また，実験を行う部屋には AR に表示される 3D モデルの確認用として，OSC 通信を行うメイン PC 上に生成される 3D モデルを表示しているため，ディスプレイの項目を設定している．

表 2: インタフェースの操作性に関する評価項目

Q1	影をうまく操作する事ができたか
Q2	実体 (球体) を思い通りに動かす事ができたか
Q3	影への操作と球体の動きは理解する事ができたか (ドラッグで横移動，ピンチアウトで上昇など)
Q4	思い通りの 3D モデル，形状を作る事ができたか

表 3: 共同作業性に関する評価項目

Q1	二人で協力して制作する事ができたか
Q2	話し合いながら制作を行うことができたか
Q3	交代しながら操作を行なったか
Q4	共同で作業するとき，操作し易いと思ったか
Q5	操作するとき相方と同じ方向から操作したか

表 4: AR の視認性に関する評価項目

Q1	操作している時，どこを見ながら操作したか (影・球体・AR・ディスプレイ (複数選択可))
Q2	AR を使って 3D モデルの形を観察できたか
Q3	共同で作業する時，3D モデルは見易かったか
Q4	AR を使って様々な角度から 3D モデルを観察できたか
Q5	目の前の空間に 3D モデルがあるかのように，制作できたか

6.3 評価実験アンケート結果

被験者全体 (人文系学生 6 名，情報系学生 14 名）のアンケート評価結果をまとめたグラフを図 10，図 11，図 12，図 13 に示す．図 10 のグラフはインタフェースの操作性に関する全体評価を示し，評価 3，評価 4 を肯定的回答として算出すると Q1 は 80 %，Q2 は 70 %，Q3 は 100 %，Q4 は 80 %が肯定的回答を得る事ができた．Q1，Q2 の結果から影を操作し球体を任意の位置に移動させる事ができた被験者が多い事がわかる．これは Q3 の結果が示すように，操作の理解が容易であることも関係していると考える．その結果 Q4 の回答は，思い通りの 3D モデルを作成する事ができたと肯定的回答を多く得る事ができたと考える．図 10 の結果から，影と球体の動きを用いるインタフェースは直感的な操作であり，意図した位置に球体を移動させ，3D オブジェクトを作成する事ができたと言える．図 11 のグラフは共同作業性に関する評価結果を示し，肯定的回答が Q1，Q2 は 100 %，Q3，Q4，でも 85 %以上と高い回答を得る事ができた．Q2 の結果が示すようにどのペアもディスカッションを行いながら共同作業をしている事がわかる．また，Q3，Q4 の結果から，互に交代しながら操作を行うペアが多い事がわかる．そして，Q5 の「操作するとき相方と同じ方向から操作したか」の回答では評価 4 の「別方向かつ複数箇所から操作した」と回答した割合が 70 %と高いことから，本システムを中心に多角的に移動しながら操作が行われた事がわかる．図 12 のグラフは，AR の視認性 Q1 に関する全体評価を示し，図 13 のグラフは，AR の視認性 Q2 から Q5 に関する全体評価を示す．Q1 の回答は複数回答可能であり，回答数としては AR が一番多かったが他の回答と大きな差は見られなかった．このことから，ユーザーは AR や他の視覚的情報を複数用いてモデリングを行っていたと考えられる．図 13 の結果のように，肯定的回答が Q2 から Q5 全ての回答において 95 %以上と高い評価を得る事ができた．Q2，Q3 の結果から AR を用いて 3D モデルを観察する事ができた事がわかり，Q4 の結果から多角的にモデルの観察を行えた事がわかる．これは，システムの 360 度フリーアクセス可能な設計と操作面に対し AR マーカを配置した事で，どの角度からでも 3D モデルを確認できたからだと考えられる．また，これらの結果から Q5 では全ての回答で肯定的回答を得る事ができたと考えられる．このことから，本システムにおける AR による複数人でのモデル観察は有効であると言う事ができる．

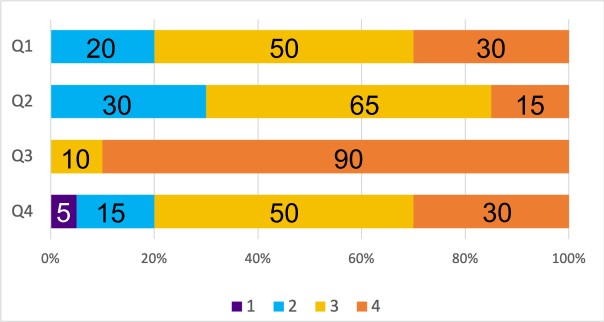

図 10: インタフェースの操作性に関する全体評価

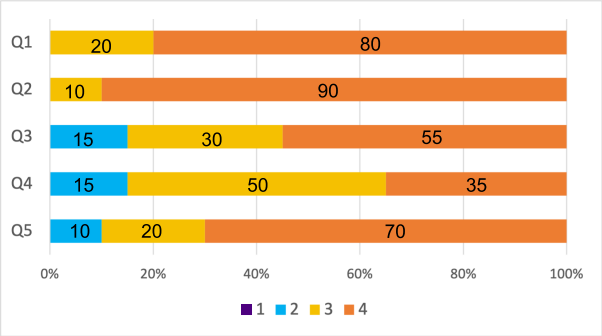

図 11: 共同作業性に関する全体評価

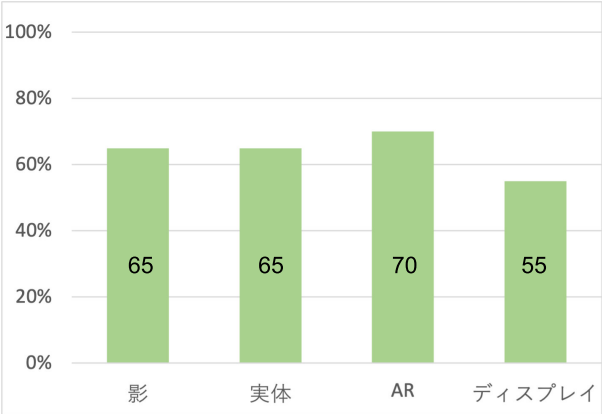

図 12: AR の視認性 Q1 に関する全体評価

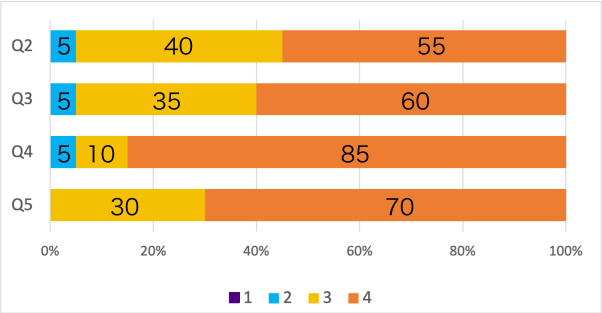

図 13: AR の視認性 Q2 から Q5 に関する全体評価

図 14 から図 16 のグラフは，回答の平均値を人文系学生と情報系学生に分け比較した図であり，エラーバーは標準偏差を示す．同様に図 17 から図 19 のグラフは回答の平均値をモデリング経験有りとモデリング経験無しの被験者に分け比較した図である．インタフェースの全体評価 (図 10) では，全体的に良い評価を得ることができたが，人文系学生と情報系学生で比較した図 14 では人文系の平均回答値が少し低い値となり，Q2 では互いに平均回答値が 3 以下の結果となり，一定数の被験者がうまく操作出来なかった事がわかる．また，共同作業性の全体評価 (図 11) からは，全体的に操作を交代しながら多角的に移動し操作している事が分かったが，図 15 では Q3，Q4，Q5 における人文系学生の平均回答値が情報系学生に比べて少し低い値となり，Q1，Q2 では平均回答値 3.7 以上と高い値となった．モデリング経験の有無で分けた図 18 でも Q1，Q2 は平均回答値 3.6 以上と高い値である．AR の視認性に対する全体評価 (図 13) では，全体的に良い評価を得る事が出来た．人文系学生と情報系学生で比較した図 16 やモデリングの有無で比較した図 19 でも平均して良い評価を得ることができた．しかし，人文系系学生と情報系学生間，モデリング経験の有無間でアンケート結果に統計的有意差があるかマン・ホイットニーの U 検定 (ウィルコクソン・マン・ホイットニー検定) を用いて操作性，共同作業性，AR の視認性の質問ごとに検定を行った結果，有意水準値 0.05 に対してどの質問でも水準値を下回る結果は得られなかったため，人文系学生と情報系学生，モデリング経験の有無で有意な差があるとは言えないことがわかった．

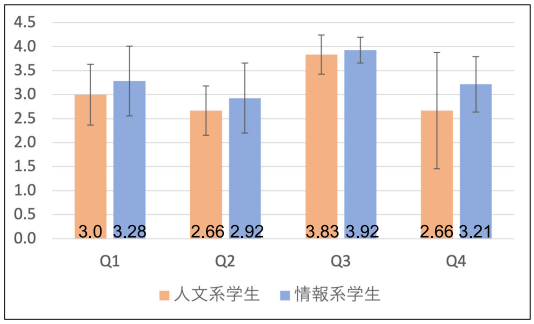

図 14: 人文系学生と情報系学生によるインタフェースの操作性に関する評価 (人文 [6 名]，情報 [14 名])

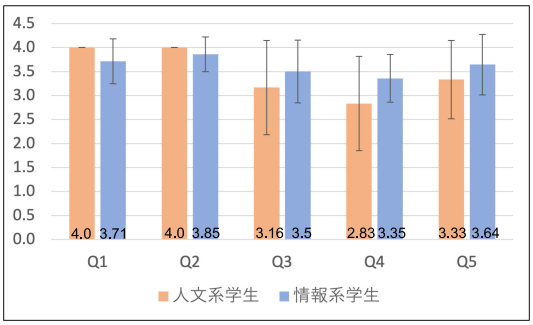

図 15: 人文系学生と情報系学生による共同作業性に関する評価 (人文 [6 名]，情報 [14 名])

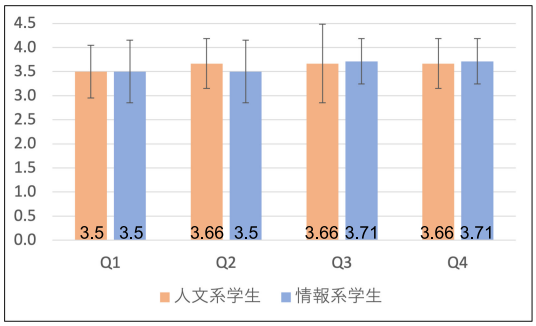

図 16: 人文系学生と情報系学生よる AR の視認性に関する評価 (人文 [6 名]，情報 [14 名])

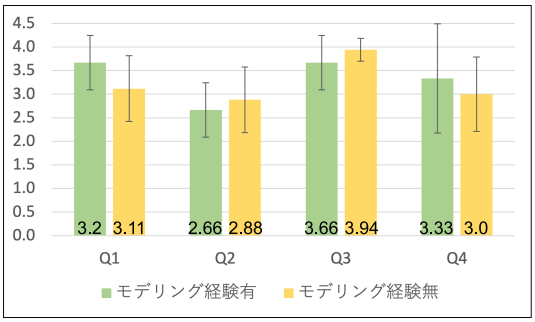

図 17: モデリング経験の有無によるインタフェースの操作性に関する評価 (経験有 [3 名]，経験無 [17 名])

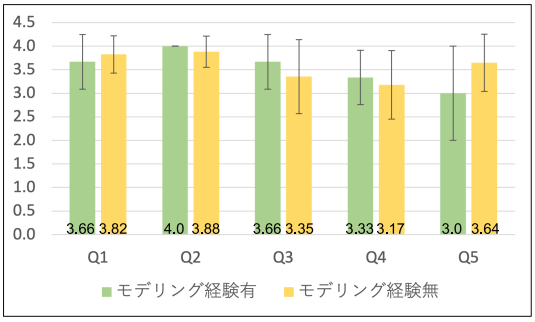

図 18: モデリング経験の有無による共同作業性に関する評価 (経験有 [3 名]，経験無 [17 名])

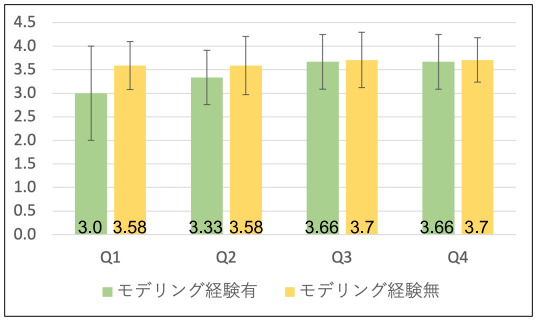

図 19: モデリング経験の有無による AR の視認性に関する評価 (経験有 [3 名]，経験無 [17 名])

6.4 評価実験インタビューから得られた意見

評価実験後にインタビュー調査を行い，感想や意見などヒアリングを行なった．感想として多く上がったのが，「楽しかった」や「影を操作する体験が新鮮だった」など影の操作体験が面白いという意見が多かった．操作性に対しては，「スマートフォンを普段使っているから操作が分かり易かった」や「曲線の操作がし易かった」「一本指の操作が簡単だった」など肯定的意見が得られた．しかし，「服が反応してしまって誤作動した」や「操作が反応しない時があった」，「三本指操作が難しかった」などの今後の課題となる意見も得られた．これはタッチパネルフレームに服の袖や掌が反応し誤作動したためであり，このことからタッチ検出の方法を検討する必要もあると考える．また，三本指での操作はロングタップなど他の操作に置き換えることを検討する．

共同作業に対する意見として，「奥側 (対角) の操作は相方に任せた」や「一緒に作ってる感じがした」，「片方が見ながら指示出すのも司令塔みたいで面白かった」などの意見を得る事ができた．また実験の様子から，お互いが対角線上に向かい合い、交互に操作するペアや，1 つのスマートフォンで一緒に観察するペア，一人は AR を使って指示を出すペアなど，様々な協力の仕方が見られた．

AR に対する意見として，「見易かった」，「いろんな方向から見るのが楽しかった」などの肯定的意見が得られた．しかし，「柱に被ると見えなくなった」や「3D モデルが被って手元が見えなかった」などの改善すべき点を指摘する意見も得られた．

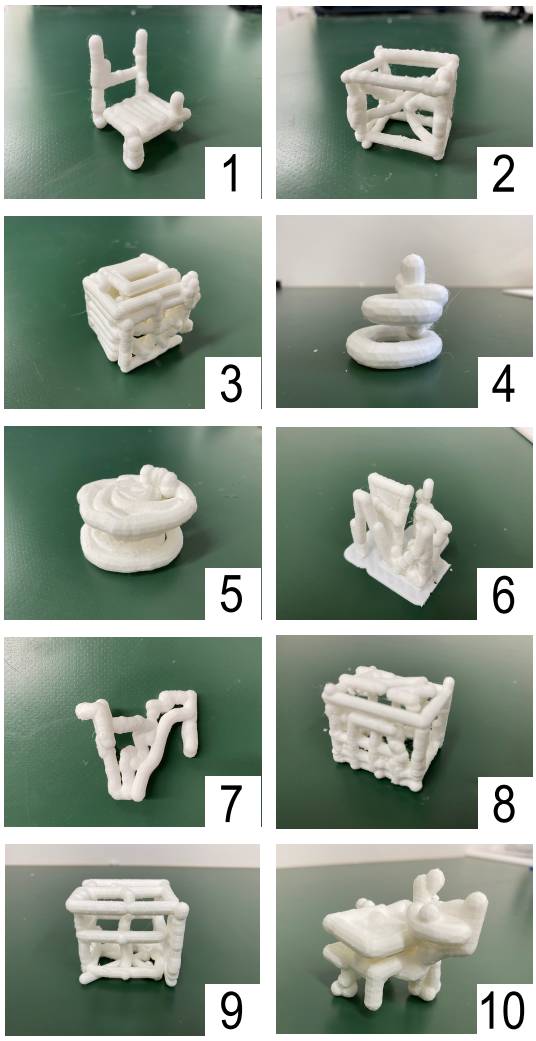

図 20: 被験者が制作した作品

図 20 は，評価実験に参加した被験者 (10 グループ) が実際に制作した作品である．一本指の直線的な操作が容易である事から 4 グループが立方体を制作しているが，4 グループとも立方体の内外に装飾を加えた造形がなされている．また，立方体を制作したグループでは，実験時に被験者同士が対角線上に位置して操作を交互に行う様子が多く見られた．これは，立方体はどの方向から観察しても概ね同じ形状に見えることや，被験者の正面にモデルを作成すると反対側が隠れてしまうため，対角位置の被験者の方が操作し易いためであると予想される．図 20 の 4，5 番目の作品は，階層を成した曲線の表現を行なっている．5 番目の作品は，三層の円が重なった形状であり，制作時には一層事に操作を交代している様子が見られた．図 20 の 6，7 番目の作品では，斜め縦方向に線を描いている作品であるが，線が少し歪んでいるの

が確認できる．実験時の様子からも斜め操作でやり直す場面が見られ，斜め縦方向の操作 (ピンチ&ドラッグ) は難易度が高い事がわかった．

7 考察と今後の課題

提案する Fab KUI の特徴である，影と球体の動きを用いたインタフェース，360 度フリーアクセス可能な設計，AR による複数人での 3D モデル観察の 3 点から有効な効果が得られるか評価実験を行い，アンケート評価の結果とインタビュー調査で得られた意見を示した．インタフェースの操作性に関して，評価実験に参加した被験者の多くがモデリング未経験者であったが図 10 の全体評価では肯定的回答を多く得る事ができた．この結果から，本手法の KUI に基づくインタフェースは，片手でドローイングするような操作により，モデリング経験を有さないユーザーでも意図した 3D モデルを作成する事が可能であると言える．しかし，人文系学生と情報系学生，モデリング経験の有無で分けた図 14 と図 14 のグラフ Q2 からもわかるように，平均評価が 3 以下であり，一定数の被験者は球体を思い通りに操作出来なかったことがわかる．これはインタビュー調査で回答された誤動作や三本指操作の難易度などが原因として考えられる．これらの解決方法として，静電容量方式のタッチパネルを使用する案や，ロングタップやダブルタップなどのジェスチャを改めて選定する事で改善できると考える．

共同作業性に関するアンケート結果では，図 11 が示すように 85 %以上の肯定的回答を得ている．この結果から Fab KUI では，インタフェース特性である 360 度フリーアクセス可能な設計により実空間で共同してモデリングを行う事が可能であると言える．そして，図 13 の AR による視認性のアンケート結果からも 95 %以上の肯定的回答を得られたことから，実空間において複数人で多角的に 3D モデルの観察を行いながら共同してモデリングする事ができたと言える．しかし，インタビュー調査の結果からは，「柱に被ると見えなくなった」や「3D モデルが被って手元が見えなかった」など AR マーカ検出の課題やオクルージョンの課題も見つかった．

AR マーカ検出について XYZ プロッタを支える設計を改善するか，AR マーカを複数枚四角に配置しマーカ検出の精度を上げる事で改善できると考える．また，現在 Apple 社が提供している ARKit4 のピープルオクルージョンの機能を用いる事で，手元を隠す事なく表示する事ができると考える．さらに，現在のシステム設計上 KUI による単一のインタフェースを共有し交互に操作を行う必要があるため，二人同時の操作は行えないが，小型ドローンを球体として用いて影を操作する事で，複数人で同時にモデリングを行う事ができると考える．

今後の課題として，インタフェースの操作精度を向上する点に加え．モデリング手法としての機能を充実させる事で，より汎用性の高いモデリングインタフェースとしての活用が望まれる．また，インタビュー調査では「楽しかった」「新鮮だった」などの意見が多かったことから，エンタテインメント性に特化させたモデリング体験を提供することもできると考える．現在 3D プリンタで印刷する事を想定し，モデリング時には単色でのモデルを表示しているが，色彩豊かなモデルを生成可能とする事で，複数人で絵具で遊ぶようなモデリング体験を提供できるのではないかと考える．そして，本稿では，遮蔽物に球体を使用しているが，遮蔽物を付け替えることで，3D オブジェクトの最小構成要素の形状を変更することも可能である．さらに，提案手法では，遮蔽物を回転させる機能を実装していないため，遮蔽物の形状を球体としたが，遮蔽物を回転させられるようにする事で，様々な形状の遮蔽物の使用とそれに合わせた 3D オブジェクトの最小構成要素を用いたモデリングが可能になると考える．

8 終わりに

本研究では，影への操作と球体の移動した軌跡から 3D モデルを生成し，スマートフォンを用いた AR 表示によって，実空間における複数人共同 3D モデリングの手法 Fab KUI を提案した．そして，提案手法に基づくシステムを実装し，評価実験の結果を示した．その結果，提案手法ではモデリング経験を有さない一般のユーザーでも，ドローイングのような操作から 3D モデルを生成する事ができ，360 度フリーアクセス可能な設計とスマートフォン AR によって，実空間において複数人で共同して 3D モデリングを可能にする結果を示した．今後の展望として，機能の追加や色の要素を加える事で，FabKUI のエンタテインメント分野での利用や，KUI を 3D モデリング以外の用途で活用することを検討する．

参考文献

[1] Casey Reas and Benjamin Fry. Procesing, 2001. https://processing.org/(参照 2021-12-01).

[2] Rendever.inc. Multibrush, 2021. https://www.oculus.com/experiences/quest/3438333449611263/(参照 2021-12-01).

[3] NTT docomo. Virtual design atelier, 2017. https://www.nttdocomo.co.jp/biz/service/vda/(参照 2021-12-01).

[4] Brinx Software. Masterpiecevr, 2017. https://masterpiecestudio.com/(参照 2021-12-01).

[5] 菊池康太, 尼岡利崇. 影ユーザーインターフェース：影をインタフェースとした実体とのインタラクション手法の提案. 芸術科学会論文誌, Vol. 16, pp. 130 – 137, 2017.

[6] 菊池康太, 尼岡利崇. Augmented shadow media：KUI を応用した影のメディア的性質を拡張するインタラクティブメディアの提案. 芸術科学会論文誌, Vol. 18, pp. 134 – 142, 2019.

[7] Kouta Kikuchi and Toshitaka Amaoka. KUI Based Puppet. In *2020 Nicograph International*, pp. 95–95, 2020.

[8] Kouta Kikuchi and Toshitaka Amaoka. KUI Based Modeling: a study for real world oriented modeling using real shadow as an interface. In *International Workshop on Advanced Imaging Technology (IWAIT) 2021*, Vol. 11766, pp. 352–357. SPIE, 2021.

[9] Manfred Lau, Masaki Hirose, Akira Ohgawara, Jun Mitani, and Takeo Igarashi. Situated modeling: A shape-stamping interface with tangible primitives. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, p. 275–282, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.

[10] Patrick Reipschläger and Raimund Dachselt. Designar: Immersive 3d-modeling combining augmented reality with interactive displays. In *Proceedings of the 2019 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, p. 29–41, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.

[11] Huaishu Peng, Jimmy Briggs, Cheng-Yao Wang, Kevin Guo, Joseph Kider, Stefanie Mueller, Patrick Baudisch, and François Guimbretière. Roma: Interactive fabrication with augmented reality and a robotic 3d printer. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, p. 1–12, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.

[12] Ke Huo, Vinayak, and Karthik Ramani. Window-shaping: 3d design ideation by creating on, borrowing from, and looking at the physical world. In *Proceedings of the Eleventh International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, p. 37–45. Association for Computing Machinery, 2017.

[13] Kin Chung Kwan and Hongbo Fu. Mobi3dsketch: 3d sketching in mobile ar. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, p. 1–11. Association for Computing Machinery, 2019.

[14] Junnosuke Nagai, Tsuyoshi Numano, Takafumi Higashi, Matthieu Tessier, and Kazunori Miyata. Tsumiki castle: Interactive vr system using toy blocks. In *Proceedings of the Virtual Reality International Conference: Laval Virtual*, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.

[15] David Anderson, James L. Frankel, Joe Marks, Aseem Agarwala, Paul Beardsley, Jessica Hodgins, Darren Leigh, Kathy Ryall, Eddie Sullivan, and Jonathan S. Yedidia. Tangible interaction + graphical interpretation: A new approach to 3d modeling. In *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, p. 393–402. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000.

[16] Yoshifumi Kitamura, Yuichi Itoh, and Fumio

Kishino. Real-time 3d interaction with active-cube. In *CHI '01 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, p. 355–356. Association for Computing Machinery, 2001.

[17] Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, Akimitsu Hogge, and Hiroshi Ishii. Inform: Dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, p. 417–426. Association for Computing Machinery, 2013.

[18] Alexa F. Siu, Son Kim, Joshua A. Miele, and Sean Follmer. Shapecad: An accessible 3d modelling workflow for the blind and visually-impaired via 2.5d shape displays. In *The 21st International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, p. 342–354. Association for Computing Machinery, 2019.

[19] Hiroshi Ishii. Illuminating clay: a tangible interface with potential grass applications. In *GRASS Users Conference*, 2002.

[20] Martin Kaltenbrunner and Florian Echtler. The TUIO 2.0 Protocol: An Abstraction Framework for Tangible Interactive Surfaces. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, Vol. 2, No. EICS, 2018.

菊池　康太

2017 年明星大学情報学部情報学科卒業．2019 年同大学大学院情報学研究科情報学専攻博士前期課程修了．現在，同大学大学院情報学研究科情報学専攻博士後期課程在学．芸術科学会学生会員, 情報処理学会学生会員, バーチャルリアリティ学会正会員．　ヒューマンコンピュータインタラクションの研究に従事．

尼岡　利崇

1992 年北海道大学大学院地球環境科学研究科修士課程修了．2003 年ニューヨーク大学 Tisch School of the Arts, Interactive Telecommunication Program 修士課程修了．2010 年東京工業大学博士 (学術) を取得．2003 年別府大学専任講師．2005 年より明星大学情報学部情報科学科専任講師．2017 年より同大学教授となり，現在に至る．ACM 会員，芸術科学会会員，情報処理学会会員．