

博士論文(情報) 2022年度

影を用いた実世界指向インタフェースによる インタラクションの研究とその応用

明星大学大学院 情報学研究科 情報学専攻

菊池 康太

2022年11月

影を用いた実世界指向インタフェースによる インタラクションの研究とその応用

論文概要

本研究では、影を用いた実世界指向インタフェースの基礎的手法として影ユーザーインタフェース (KUI) を提案し、影をインタフェースとした応用手法として、影のメディアとしての性質を拡張するインタラクティブメディア、3D モデリング手法とデジタルファブリケーション手法、影の芸術表現の3つの応用例について述べる。また、KUI の基礎的手法から応用手法について、その実装方法と評価結果を示し各応用手法から、実世界において影をインタフェースとして用いる有効性について述べる。

情報技術の発展によりコンピュータが多種多様な場面で使用され、利用シーンに合わせたコンピュータのユーザーインタフェースや、それに伴うインタラクションが提案されてきた。それらインタフェースでは、従来のコンピュータ特性に合わせたインタフェースとは異なり、人間工学や、人文科学に基づく特性を考慮したインタフェースが提案されている。その中でも実世界指向インタフェースに分類されるインタフェースは、実世界の物体を操作する事で仮想空間の情報を操作したり、普段使用しているアナログな道具を扱う感覚でコンピュータを操作することが可能になる。実世界指向インタフェースには、我々が普段の生活で使用するペンや紙、机などのアナログな道具を用いる例と、植物や水、風や光などの自然物や自然現象を情報技術と合わせて用いる例が挙げられる。特に自然物を扱う実世界指向インタフェースは、自然物や自然現象が持つ物理特性や、文化的背景からインタフェースの操作理解を促し、直感的な操作や情報提示が可能であると考えられる。

そこで本稿では、自然現象を用いた実世界指向インタフェースとして、影をインタフェースに用いる影ユーザーインタフェース (KUI) を提案する。KUI では、物体の影をインタフェースとして操作することで、その影を持つ物体の位置や動作を変化させるインタラクションが可能になる。通常であれば影は、物体の位置や動作によって影の位置や形状も変化するが、KUI が提案するインタフェースの概念では、影と物体の物理的関係性を逆転させ、影を変

更することでその影を持つ物体に影響を与える事象へと変化させる。

本稿では、影を操作する事で物体の動作を変化させるインタラクションの基礎的研究として、KUIを用いたインタラクション手法を複数提案し、KUIの操作に使用するジェスチャーと、それに伴う物体の動作を示し、その実装方法について述べる。また、提案するKUIの基礎となるインタラクション手法について、インタフェースの操作性や操作の理解度についてユーザー評価を行い、システムの動作精度や追従性について動作評価を行うことで、KUIの基礎システムにおける有効性を示す。そして、KUIの応用手法として、①影のメディアとしての性質を拡張するインタラクティブメディア、②3Dモデリング手法とデジタルファブリケーション手法、③影の芸術表現の三つの手法を提案する。

①影のメディアとしての性質を拡張するインタラクティブメディアへの応用手法では、視覚メディアとしての性質を持つ影絵のメディア的性質を拡張する。従来の影絵の保存再生方法は、カメラで撮影された映像をディスプレイで再生する方法が一般的であるが、カメラ性能や、撮影環境によって保存される影絵の情報は変更されてしてしまう。また、再生する際もディスプレイ解像度によって影絵の解像度も変更される。本稿では、影絵の情報を変更することなく保存再生を可能にするインタラクティブメディアを提案し、影のメディア的性質を拡張する。

②3Dモデリング手法とデジタルファブリケーション手法への応用では、KUIの基礎システムで提案する影への複数ジェスチャーによって可能になる実空間での物体の3次元移動を用いて、3Dモデリングを行う。物体が実空間でのカーソルの役割を果たし、その物体の移動した軌跡を用いて3Dモデルを作成する。また、KUIの3Dモデリング手法にスマートフォンARを用いる事で、作成中のモデルを様々な角度から観察することが可能になる。これによりファブリケーションスペースなどでの共同作業や、作成中の3Dモデルを中心とした円滑なコミュニケーションをサポートすることが可能となる。

③影の芸術表現への応用では、影絵の映像表現を拡張する手法として、「Animated KUI」と「KUI Based Puppet」を提案する。Animated KUIでは、影絵のアニメーションを鑑賞する際のインタフェースとコンテンツとしての影を一体化させ、鑑賞する影のアニメーションを直接操作するインタラクションを提案する。KUI Based Puppetは、影絵の動きを作る際のインタフェースを拡張し、影を直接操作して影のアニメーションを作成するインタフェースを提案する。この二つの手法を用いることで、映像芸術としての影の表現を拡張することが可能である。

本稿では、影ユーザーインタフェース(KUI)とKUIのインタラクションを応用した三つの手法を提案し、その実装方法と評価結果について述べる事で、影を実世界指向インタフェースとして用いる基礎的指標を示し、その応用手法として三つの手法を提案し、影を実世界指

向インタフェースとして用いる有効性が示された.

キーワード

ヒューマンコンピュータインタラクション, ヒューマンインタフェース, 実世界指向インタフェース, インタラクティブアート, メディアアート, 影, シェドーアート

明星大学大学院 情報学研究科 情報学専攻

菊池 康太

目 次

第 1 章 序論	1
1.1 背景	1
1.1.1 自然物や自然現象を用いた実世界指向インタフェース	3
1.1.2 自然物や自然現象を用いたインタラクティブアートとメディアアート	4
1.1.3 影を用いた実世界指向インタフェースとインタラクティブメディア	5
1.2 本研究の目的	6
1.2.1 影を用いた実世界指向インタフェースにおける基礎システムの提案	7
1.2.2 影のメディアとしての性質を拡張するインタラクティブメディアの提案	7
1.2.3 KUI を応用した 3D モデリング手法とデジタルファブリケーション手法の提案	7
1.2.4 KUI を応用した影の芸術表現作品の提案	7
1.3 研究の新規性	8
1.4 論文の構成	8
第 2 章 関連研究	10
2.1 はじめに	10
2.2 HCI におけるユーザーインタフェース研究	10
2.2.1 Tangible User Interface	10
2.2.2 Natural User Interface	14
2.2.3 Ambient User Interface	16
2.2.4 実世界指向インタフェースの有効性	19
2.3 影を用いたユーザーインタフェース研究	20
2.3.1 影を用いたポインティングインタフェースに関する研究	20
2.3.2 影を入力とする物体の形状生成に関する研究	22
2.3.3 影をインタフェースにした照明操作に関する研究	23
2.4 影を用いたインタラクションに関する研究	24
2.4.1 身体影を仮想影で拡張したインタラクション	24
2.4.2 影ディスプレイとのインタラクション	26

2.5	従来研究と本研究の差異	27
第3章	影を用いた実世界指向インタフェース	29
3.1	影の性質	29
3.2	KUIについて	31
3.3	KUIの新規性	31
3.3.1	インタラクションの新規性	31
3.3.2	ユーザーインタフェースとしての特徴	32
3.4	本研究におけるKUIの位置付け	33
3.5	影を用いた実世界指向インタフェースにおける基礎システムの提案	33
3.5.1	ピンチジェスチャによる物体の垂直移動システム	33
3.5.2	タッチジェスチャによる移動停止システム	34
3.5.3	ドラッグジェスチャによる物体の水平移動システム	35
3.6	影を用いた実世界指向インタフェースにおける基礎システムの実装方法	36
3.6.1	影へのタッチ検出	36
3.6.2	ピンチジェスチャによる物体の垂直移動システムの実装	37
3.6.3	タッチによる移動停止システムの実装	39
3.6.4	ドラッグジェスチャによる物体の水平移動システムの実装	42
3.7	複数ジェスチャによる物体の三次元移動システムの提案と実装	44
3.7.1	物体の3次元移動インタラクションにおける操作と影の変化	44
3.7.2	システム設計	45
3.7.3	システムの実装	48
第4章	影を用いた実世界指向インタフェースにおける基礎システムの評価	52
4.1	ユーザ評価によるインタフェースの操作性評価実験	53
4.1.1	評価項目	53
4.1.2	アンケート調査内容	54
4.1.3	評価結果からの考察	54
4.2	動作実験によるシステムの精度評価	57
4.2.1	評価項目	58

4.2.2	評価内容	58
4.2.3	評価結果	59
4.2.4	評価からの考察	59
4.3	二つの評価結果からの考察	59
4.4	本章のまとめ	60
第 5 章	KUI の発展とメディアとしての影の拡張	61
5.1	影のメディア的性質について	61
5.2	Augmented Shadow Media について	62
5.2.1	操作方法とインタラクションにおける物体と影の変化	63
5.2.2	影の保存と再生	63
5.3	動作実験	64
5.3.1	動作の様子	65
5.3.2	アニメーションの時間的精度に関する評価	66
5.3.3	システム評価の結果	66
5.3.4	考察	67
5.4	本章のまとめ	68
第 6 章	KUI を用いた 3D モデリングとデジタルファブリケーションへの応用	69
6.1	KUI Based Modeling について	69
6.1.1	HCI 分野における 3D モデリング研究の動向	69
6.1.2	システム構成	71
6.1.3	操作方法とインタラクション	72
6.1.4	システムの実装	73
6.1.5	システムの統合と動作実験	75
6.2	FabKUI への応用	77
6.2.1	デジタルファブリケーションとモデリング環境の動向	78
6.2.2	FabKUI の関連研究	79
6.2.3	FabKUI の設計とシステム実装	81
6.3	動作実験	84

6.4	評価実験	86
6.4.1	評価項目	87
6.4.2	評価結果	88
6.4.3	評価実験インタビューから得られた意見	94
6.5	考察	95
6.6	本章のまとめ	97
第7章	KUIを用いたメディアアートと影の芸術表現への応用	99
7.1	実影の映像表現手法	99
7.2	Animated KUI について	102
7.2.1	Animated KUI のシステム構成	102
7.2.2	Animated KUI のインタラクションと映像表現	103
7.3	KUI Based Puppet について	105
7.3.1	KUI Based Puppet のシステム構成	105
7.3.2	KUI Based Puppet のインタラクションと映像表現	107
7.4	芸術表現についての考察	109
7.5	本章のまとめ	109
第8章	考察	111
8.1	KUI 基礎システムについての課題と考察	111
8.1.1	KUI のインタフェース概念について	111
8.1.2	システムの改善について	112
8.1.3	物体と光源の位置関係について	112
8.1.4	複数ジェスチャの統合について	113
8.2	KUI の応用手法についての課題と考察	113
8.2.1	影のメディアとしての性質を拡張するインタラクティブメディアについて	113
8.2.2	3D モデリングとデジタルファブリケーションについて	114
8.2.3	影の芸術表現について	115
8.3	今後の展望	116

8.3.1	物体の形状変形について	116
8.3.2	影のカービングと回転物体の形状変形について	117
8.3.3	複数物体の同時制御について	117
第 9 章 結論		118
参考文献		121

図 目 次

1.1	NUI に分類されるインタフェース	2
1.2	自然物や自然現象を用いた実世界指向インタフェース	3
1.3	自然物や自然現象を用いたインタラクティブアート	4
1.4	影を用いた実世界指向インタフェースとインタラクティブメディア	5
2.1	Tangible Bits の概念図	11
2.2	musicBottles	12
2.3	Reactable	13
2.4	SmartSkin	13
2.5	g-stalt	15
2.6	Corteza	15
2.7	ファウンド・イン・トランスレーション	16
2.8	MOSS-Xels	17
2.9	CyborgBotany	18
2.10	Pinwheels	18
2.11	影を用いた指差し操作によるデジタルサイネージ	21
2.12	影の特性を利用した実世界指向型インタフェースのデザイン	21
2.13	Shadow art	22
2.14	浮遊物体を用いたインタラクティブなシャドウアート生成システム	22
2.15	Lighty	23
2.16	A User Interface for Interactive Cinematic Shadow Design	24
2.17	Transforming your shadow into colorful visual media	25
2.18	実物の影による仮想の影とのインタラクション	25
2.19	Bounsight Shadow	27
2.20	仮想の影とユーザーの実影とのインタラクションの様子	27
2.21	ディスプレイを傾けることで仮想の影とのインタラクションを行う様子	27
3.1	Shadow dancing	30

3.2	ワヤン・クリ	30
3.3	Parade	31
3.4	Immersive Shadow	31
3.5	影への操作による影響の循環	32
3.6	ピンチジェスチャによる垂直移動システムの操作概念	34
3.7	ピンチジェスチャによる垂直移動システム	34
3.8	タッチジェスチャによる移動停止システムの操作概念	35
3.9	タッチによる物体の移動停止システムシステム	35
3.10	ドラッグジェスチャによる水平移動システムの操作概念	36
3.11	FTIR タッチパネルの構造図	37
3.12	FTIR にてキャプチャしたタッチ画像	37
3.13	タッチ検出を行なう画像処理の手順	37
3.14	物体の垂直移動システムにおける物体の位置関係	38
3.15	垂直移動システムの FTIR 設計図	38
3.16	ピンチジェスチャによる物体の垂直移動システムのプロトタイプ	39
3.17	ピンチジェスチャによる物体の垂直移動システムの操作の様子	39
3.18	移動停止システムの FTIR 設計図	40
3.19	実際に制作した移動停止システムの FTIR	40
3.20	タッチによる移動停止システムに用いる物体の機構	41
3.21	移動停止システム正面図	41
3.22	移動停止システムの操作の様子	42
3.23	ドラッグジェスチャによる物体の水平移動システムの設計図	43
3.24	実際に使用した XY プロッター	43
3.25	複数ジェスチャによる物体の三次元移動システムの構成図	44
3.26	物体の水平方向移動に用いるドラッグジェスチャ	45
3.27	物体の垂直方向移動に用いるピンチイン・ピンチアウトジェスチャ	46
3.28	垂直移動機構の初期設計図	47
3.29	実験用に制作した初期設時の 垂直移動機構	47
3.30	物体の垂直移動機構に採用する引き上げ機構	47

3.31 制作した垂直移動機構	49
3.32 制作した複数ジェスチャによる物体の三次元移動システム	49
3.33 ドラッグジェスチャによる物体の水平移動の様子	50
3.34 ピンチジェスチャによる物体の垂直移動の様子	50
3.35 物体の3次元移動における一連の操作の様子	51
4.1 評価実験環境	53
4.2 Q1 の回答結果	55
4.3 新規性についての実験結果	56
4.4 概念の理解についての実験結果	56
4.5 操作性についての実験結果	57
4.6 動作実験に用いる動き	58
5.1 保存処理と再生処理のシーケンス図	64
5.2 操作時と再生時の空間的比較	65
5.3 評価実験に用いる操作	66
6.1 KUI Based Modeling	70
6.2 KUI Based Modeling の操作の様子	70
6.3 タッチパネルモジュール	71
6.4 ラック& ピニオン機構	72
6.5 システムの動作フロー	72
6.6 4つのジェスチャ操作	73
6.7 実装した物体の移動機構	74
6.8 3D モデリングを可能にする3種類の操作 (A:ドラッグ, B:ピンチ, C:ドラッグ&ピンチ)	75
6.9 モデリング例: ハート	76
6.10 モデリング例: 椅子	76
6.11 3D プリンタにて出力されたモデル (ハート, 花, 机, 椅子)	76
6.12 FabKUI のシステム	77
6.13 FabKUI のシステム構成図	82

6.14	3D モデル作成中の様子	84
6.15	作成した 3D モデルと 3D プリントの結果	85
6.16	スマートフォン画面のキャプチャ画像	86
6.17	インタフェースの操作性に関する全体評価	89
6.18	共同作業性に関する全体評価	90
6.19	AR の視認性 Q1 に関する全体評価	90
6.20	AR の視認性 Q2 から Q5 に関する全体評価	91
6.21	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	92
6.22	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	92
6.23	人文系学生と情報系学生による AR の視認性に関する評価	93
6.24	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	93
6.25	モデリング経験の有無による共同作業性に関する評価	94
6.26	モデリング経験の有無による AR の視認性に関する評価	94
6.27	被験者が制作した作品	96
7.1	LOST #16	101
7.2	エントロピア	101
7.3	16 Forms	101
7.4	Animated KUI のシステムイメージ	102
7.5	影アニメーション生成するシステムの構成要素	103
7.6	Animated KUI の操作とインタラクション	104
7.7	実際の操作の様子	104
7.8	Animated KUI の影アニメーション	105
7.9	KUI Based Puppet のシステム	106
7.10	KUI Based Puppet のシステム構成要素	107
7.11	KUI Based Puppet のシステム概要	107
7.12	KUI Based Puppet のインタラクション	108

表 目 次

3.1 KUI による影への操作と物体の動作	32
4.1 各モータの動作速度 (mm/s)	59
5.1 時間的精度の評価結果 (秒)	66
6.1 インタフェースの操作性に関する評価項目	87
6.2 共同作業性に関する評価項目	88
6.3 AR の視認性に関する評価項目	88

第1章 序論

1.1 背景

情報技術の発展によりコンピュータが多種多様な場面で使用されるようになった事で、利用シーンに合わせたコンピュータのインタフェースや、それに伴うインタラクションが提案されてきた。それらインタフェースでは、従来のコンピュータ操作に特化したインタフェースとは異なり、人間工学の特性を考慮したインタフェースが提案されている。例として、人体の動作を入力としてコンピュータの操作やゲームを遊べる、図 1.1a の Microsoft Kinect[1] や、空間ハンドジェスチャを入力としたコンピュータ操作や仮想空間のオブジェクト操作などが可能な図 1.1b の Ultraleap 社の LeapMotion[2]、視線追跡によりマウスを操作する図 1.1c の Tobbi テクノロジ社のアイトラッカー [3] などがある。これらのインタフェースは NUI(Natural User Interface) に分類され、人間の自然な身体動作やハンドジェスチャ、視線を操作に用いる事で、コンピュータの知識を有さないユーザでも直感的な操作を可能にする。また、MIT メディアラボの石井が提唱した Tangible Bits[4] は、実空間の物体に仮想空間の情報を付与し、物理空間の物体を動かしたり操作する事で仮想空間の情報にアクセスできる概念である。従来のマウスやキーボードで行う、ディスプレイ面に表示される GUI(Graphical User Interface) の操作とは異なり、NUI や Tangible Bits では、人間の身体が物理世界にあることから、物理的で自然な身体動作によって情報を操作する概念や、物理世界の物体を操作するような感覚で情報を操作する概念をインタフェースとして取り入れている。このような身体を含めた実世界の情報を操作する事でコンピュータを制御するインタフェースや、仮想世界の情報にインタラクトするためのインタフェースは、実世界指向インタフェース [5] と呼ばれる。これら実世界指向インタフェースは、マウスを使ってディスプレイ面の GUI 操作する仮想的で複雑な操作概念と比較し、人間の身体的動作や、物体を置く、動かすなどの日常的に行われる動作をインタフェースの操作概念にしていることから、直感的で理解が容易であると考えられる。NUI や Tangible Bits を含む実世界指向インタフェースは、コンピュータの知識を有さないユーザでも容易に操作可能である点に加え、ユーザがコンピュータの存在を意識せずに操作を可能にする点に特徴がある。例として、車の運転などユーザが他のタスクに集中している状況や、ゲーム、アトラクション、芸術作品などのコ

ンテンツに集中している状況、日常的な空間で過度な情報を与えたくない状況などで、実世界指向インタフェースは情報操作手法として有効である。



KINECT™
for XBOX 360.

(a) Microsoft Kinect[1]



(b) Leap Motion[2]



(c) Tobii EyeTrack[3]

図 1.1: NUI に分類されるインタフェース

1.1.1 自然物や自然現象を用いた実世界指向インタフェース

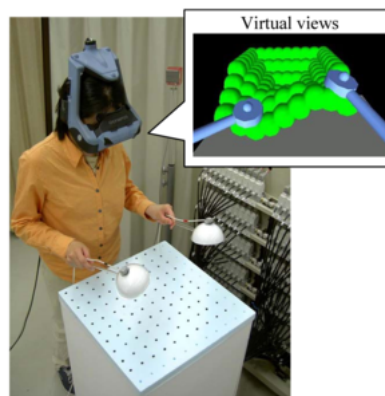
実世界指向インタフェースの研究動向においては、NUIやTangible Bitsのような研究の他に、図1.2のように、自然界の物質(以降、自然物とする)をインタフェースにする研究も多く行われている。我々の日常で頻繁に目にする自然物をインタフェースとする研究として図1.2(a)に示す、電気刺激を用いて植物を出力インタフェースとする「Botanical Puppet」[6]や、植物に対するアクチュエータによる物理刺激で植物を操作し入力インタフェースとして用いる「IO Plant」[7]などが挙げられる。これら研究の他に、図1.2(b)の水や図1.2(c)の風などを用いた研究[8][9]が提案されている。このように、近年提案される自然物や自然現象を用いた実世界指向インタフェースは、情報工学的視点で設計されてきた従来コンピュータのマウスやキーボード、GUIとは異なり、物理法則や自然科学的観点から設計した入出力インタフェースをコンピュータの操作に用いる。これにより、日常的に見られる自然物や自然現象の物理的現象をメタファーにコンピュータの入出力結果をユーザに想起させることで、我々の生活環境に適した情報提示を可能にする。



(a) 植物を用いたインタフェース [6]



(b) 水を用いたインタフェース [9]



(c) 風を用いたインタフェース [8]

図 1.2: 自然物や自然現象を用いた実世界指向インタフェース

1.1.2 自然物や自然現象を用いたインタラクティブアートとメディアアート

これら自然物や自然現象を利用したインタフェースは従来のコンピュータを操作する用途の他に、図 1.3 のように情報技術を用いたインタラクティブアートやメディアアートの入出力インタフェースとしても使用される。従来のコンピューターアートの中で、インタラクティブアートやメディアアートは、実世界の物理的入力値を作品に取り込むものや、計算結果を実世界への物理的出力へと変換する作品が多く、それら作品の意図やコンセプトを表現するために、自然物や自然現象を利用した実世界指向インタフェースを用いる例は多い[10][11][12][13]。また、作品のモチーフとなる自然物や自然現象をそのままインタフェースに用いる事で、作品のテーマに合った表現やインタラクションも可能となる。



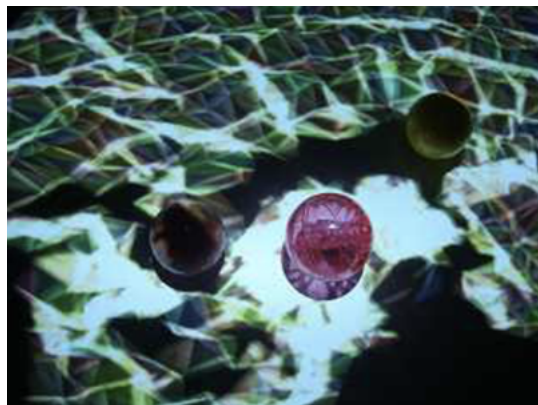
(a) 石を入力インタフェースに用いた,
Imaginature[10]



(b) 水滴を出力インタフェースに用いた,
Rain Room[11]



(c) 風を入力インタフェースに用いた,
Windswept[12]

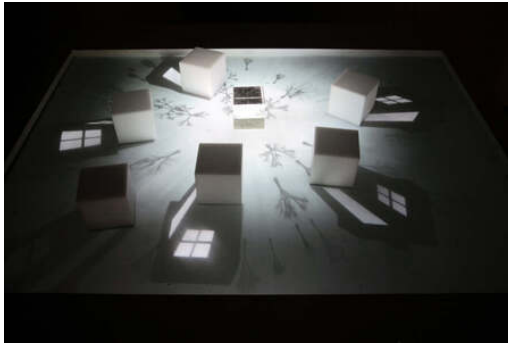


(d) 砂を入力インタフェースに用いた,
Magnet Sand play[13]

図 1.3: 自然物や自然現象を用いたインタラクティブアート

1.1.3 影を用いた実世界指向インタフェースとインタラクティブメディア

自然現象を用いた実世界指向インタフェースや、インタラクティブアートが提案される中で、図 1.4 の様に、影を用いた実世界指向インタフェースや、インタラクティブアートも多く存在する。影は物体が光を遮蔽した物理現象であるが、その物理特性や文化的背景から、メタファーとして実世界指向インタフェースの概念に用いる研究 [14][15] や、図 1.4a の様にインタラクティブアートに用いる作品 [16]、図 1.4b の様にメディアインスタレーションに用いる作品 [17]、図 1.4c の様にインタラクティブメディアとして影を用いる作品 [18] が多く存在する。影は、普段の生活の中で必ず目にする自然現象であり、ユーザは光と物体と影の物理的関係性を理解している。そのため、これらの実世界指向インタフェースでは、影と物体の物理的関係性をメタファーとして用いる事で、インタフェースの操作理解を促す手法を提案している。またアート作品では、影と物体の物理法則とは異なる結果を示す事で、鑑賞者へ錯覚や驚きを与え、作品のコンセプトや世界観を表現している。



(a) Augmented Shadow[16]



(b) Augmented Shadow-Insed[17]



(c) Shadow Touch[18]

図 1.4: 影を用いた実世界指向インタフェースとインタラクティブメディア

1.2 本研究の目的

1.1 節で述べたように、これまでの実世界指向インタフェースの研究動向では、自然物や自然現象を用いたインタフェースが多く提案され、ユーザの文化的背景から直感的な操作を想起させるインタフェースを提供している。また、それら自然物や自然現象を用いた実世界指向インタフェースは、コンピュータのファイル操作、マウスポインタとしての使用を目的としたインタフェースとして、またインタラクティブアート、メディアアートなどのコンピュータを扱うアート作品のインタフェースとして、芸術分野でも使用されている。そして、それらコンピュータ操作やインタラクティブアートに用いられる実世界指向インタフェースには、1.1.3 項で述べた様に、自然現象である影を使用した研究や作品があり、影の特性を活かした情報提示や身体性のあるインタフェースが多く提案されている。影を用いた実世界指向インタフェースやインタラクティブアート、メディアアートが多く提案される要因として、ユーザが影の物理特性と文化的背景から影の操作方法や作品のコンセプトを理解し易い点に加え、影の制御が容易である点が挙げられる。影は光を遮ることで生成可能であり、プロジェクションを用いるインタラクティブアートや映像表現への応用が容易である。しかし、これらの多くは、コンピュータグラフィックス (CG) で生成される仮想の影 (以降、CG 影とする) を制御し、物体の実影の位置に CG 影を投影することで物体の影を擬似的に表現している。CG 影は柔軟な影の表現が可能であるが、操作に対する遅延や陰影表現などで CG であることがユーザに理解されてしまうと、インタラクティブな作品が多く世に出ている現代では、その効果は減少してしまうと考える。また、CG 影は柔軟な表現が可能であるため、ユーザが物体を操作した入力結果を表現する出力インタフェースとして用いられることが多い。

そこで、本研究では、自然現象として「影」を用いた新しい実世界指向インタフェースを提案し、影を入力インタフェースとして、その影を持つ物体に影響を与えるインタラクション手法を提案する。また、提案手法の応用例を複数示し、実世界指向インタフェースとしての有効性を示すため、以下の 4 点を本研究の目的とする。

- (1) 影を用いた実世界指向インタフェースを提案するため、影を操作して物体に影響を与えるインタフェース概念を実現するインタラクションの基礎システムを実装する。
- (2) 影のメディアとしての性質を拡張するインタラクティブメディアを提案する。
- (3) 影を用いた実世界指向インタフェースを 3D モデリングとデジタルファブリケーションに応用し、実世界によるモデリング手法を提案する。
- (4) 影を用いた実世界指向インタフェースを応用した影の芸術表現作品の提案と影のアニメーションを拡張する手法を提案する。

1.2.1 影を用いた実世界指向インタフェースにおける基礎システムの提案

本研究では、影を用いた実世界指向インタフェースとして、「影ユーザーインタフェース (KUI)」を提案し、影から物体に影響を与えるインタフェース概念、インタラクション手法、実装方法を示す。また、提案するインタフェース概念を実現するための基礎システムとして、4つのインタラクション手法を実装する。

- ピンチジェスチャによる物体の垂直移動システム
- タッチジェスチャによる物体の移動停止システム
- ドラッグジェスチャによる物体の水平移動システム
- 複数ジェスチャによる物体の3次元移動システム

1.2.2 影のメディアとしての性質を拡張するインタラクティブメディアの提案

影を用いた実世界指向インタフェースを応用するため、メディアとしての影の情報を変更する事なく保存・再生可能にする Augmented Shadow Media を提案する。これにより、影のメディアとしての性質を拡張し、従来の保存方法では変更されていた影の視覚情報を変更することなく保存・再生が可能となる。

1.2.3 KUIを応用した3Dモデリング手法とデジタルファブリケーション手法の提案

影を用いた実世界指向インタフェースによって、物体の3次元移動から生成される軌跡を3Dモデリングへ応用する KUI Based Modeling を提案する。また、KUI Based Modeling を発展させ、ファブリケーションスペースなどのパブリックなものづくり空間において、スマートフォンARを用いて複数人で3Dモデルを観察可能にする FabKUI を提案する。これにより、実空間における物体をインタフェースとした3Dモデリングが可能となり、実空間上でディスプレイを隔てる事なく複数人で3Dモデルの観察が可能となる。

1.2.4 KUIを応用した影の芸術表現作品の提案

影を用いた実世界指向インタフェースを応用した影の芸術表現作品として、影アニメーションを直接操作しアニメーションの再生操作を可能にする Animated KUI を提案し、人形型物体の影を直接操作し、影アニメーションの編集・保存・再生を可能にする KUI Based

Modeling を提案する。これにより、影のアニメーションの編集・保存・再生をインタラクティブに行う事が可能となる。

1.3 研究の新規性

本研究では、影を用いた実世界指向インタフェースにおいて、影を入出力インタフェースに用いることで、その影を持つ物体とのインタラクションを可能にする。影ユーザーインタフェース (KUI) を提案し、KUI における複数のインタラクション手法とその実装例について述べる。それにより、従来研究では出力インタフェースとして使用される事が多い影において、影を入力インタフェースとして用いる際の操作方法や、インタラクションの例を示し、実世界指向インタフェースにおける影の表現領域を広げる事ができる。また、KUI のインタラクションでは、影を入力インタフェースに用いる事で、その影を持つ物体の位置や動作を変化させるインタラクションを可能にする。従来の HCI 研究における、物体とのインタラクション手法は、空間ジェスチャラル UI や TangibleUI が主であるが、KUI の操作では、影に対して直接ジェスチャ操作をすることで対象物体とのインタラクションを可能にする点で新規性を有する。そして、KUI における基礎的インタラクション手法を応用した三つの異なる応用例を提案し、その実装方法について述べることで、影を実世界指向インタフェースに用いる際の有効性を示す。

1.4 論文の構成

本研究では、影を操作する事で物体の動作を変化させるインタラクションの基礎的研究として、KUI を用いたインタラクション手法を複数提案し、KUI のインタラクション手法を応用した三つの異なる応用例を提案し、その実装方法を示す。

本稿では、2 章で本研究における関連研究として、従来の HCI におけるユーザーインタフェースの動向について述べる。また、同章にて従来の影を用いたユーザーインタフェース研究、影を用いたインタラクション研究について、本研究との差異を述べる。

3 章では、KUI の基礎となるインタラクション手法を複数示し、KUI が可能とする操作とインタラクションについて述べる。また KUI のシステム設計と実装方法を述べることで再現性示す。

4 章では、KUI の基礎システムに対して、インタフェースの操作性や操作の理解度についてユーザー評価を行い、システムの動作精度や追従性について動作評価を行うことで、KUI の基礎的システムにおける有効性を示す。

5章では、KUIの応用手法として、視覚メディアとしての性質を持つ影絵の性質を拡張するインタラクティブメディアとして Augmented Shadow Media を提案し、インタラクティブ手法や実装方法について述べる。Augmented Shadow Media では、影絵の情報を変更することなく保存再生を可能にする手法を実装し、影のメディア的性質を拡張する。

6章では、KUIの二つ目の応用手法として、3Dモデリングとデジタルファブリケーションへの応用手法として KUI Based Modeling と FabKUI を提案する。

7章では、映像芸術表現への応用では、影絵の映像表現を拡張する手法として、「Animated KUI」と「KUI Based Puppet」を提案する。Animated KUIでは、影絵のアニメーションを鑑賞する際のインタフェースとコンテンツとしての影を一体化させ、鑑賞する影のアニメーションを直接操作するインタラクティブを提案する。KUI Based Puppet は、影絵の動きを作る際のインタフェースを拡張し、影を直接操作して影のアニメーションを作成するインタフェースを提案する。

8章では KUI の基礎的システムから三つの応用手法について、実装や評価実験で得られた結果を元に考察を行い、今後の課題と展望について述べる。

9章では、本論文をまとめ、結論を述べる。

第2章 関連研究

2.1 はじめに

本章では本研究の関連研究として、初めにヒューマンコンピュータインタラクション (Human Computer Interaction HCI) 分野における、これまでの実世界指向インタフェース研究の動向について、Tangible User Interface, Natural User Interface, Ambient User Interface の3つのカテゴリに分けて説明する。次に、影を用いた実世界指向インタフェースの従来研究について述べ、どのような手法を用いて、影をインタフェースへ応用可能か説明する。そして、従来研究における影を用いたインタラクション手法について述べ、本研究が可能とする影によるインタラクション手法との差異を示す。

2.2 HCIにおけるユーザーインタフェース研究

本節では、HCIにおけるユーザーインタフェース研究の動向について、本研究に関連するUI研究として、Tangible User Interface(Tangible UI), Natural User Interface(Natural UI), Ambient User Interface(Ambient UI) について述べる。

2.2.1 Tangible User Interface

Tangible User Interface(以降, Tangible UI とする) とは、実世界における物体をデバイスとして、直接触れることで操作を直感的に知覚できるインタフェースである。従来のCUI(Character User Interface) やGUI(Graphical User Interface) では、平面ディスプレイに表示される、テキストやグラフィカルなアイコンをキーボードやマウスで操作する事で、視覚情報を中心とした操作感を提供してきた。Tangible UIでは、物体と情報を紐付け、直接的かつ直感的に操作する事で、視覚的情報に加え触覚的なフィードバックを得る事ができる。

(1) Tangible Bits

図 2.1 は、石井らが提案する Tangible UI 研究の基礎概念を示す。「Tangible Bits」[4] は、デジタル情報と物理的な物体、表面、空間をリンクさせたユーザーインタフェースをデザインしている。これらは、人間の触覚や運動感覚を利用した把持可能な物体や、拡張されたサーフェイスによるフォアグラウンドインタラクション、光や音や空気の流れを用いたアンビエントメディアを利用した情報提示が含まれる。石井が所属する MIT Medelia LAB の Tangible Media Group では、これらの概念を元に様々な Tangible UI 研究を提案し、HCI 分野に大きな貢献と影響を与えている。

(2) musicBottles

図 2.2 は、Tangible UI 研究初期に石井らが提案した、「musicBottles」[19] であり、物理的な瓶をインタフェースに用いるインタラクティブメディアである。musicBottles では、食品や液体などを保存するために用いられる瓶をメタファーとして用いて、ビンの中に音や音楽を保存し再生する事が可能となる。専用のテーブルに瓶を配置し蓋を開けることで、瓶に保存されている音楽トラックを操作することができる。従来の音楽プレイヤー操作は GUI やボタンで再生するデバイスによって異なり、UI も直感的でないものが多い。musicBottles では、瓶に保存される物を音楽データと見立てることで、蓋を開け中身を取り出すという行為を音楽を再生するという操作に変換する。それにより、我々の日常的経験から想起される操作に対する結果をインタフェースの概念として用いることで、直感的な情報操作手法を提案している。

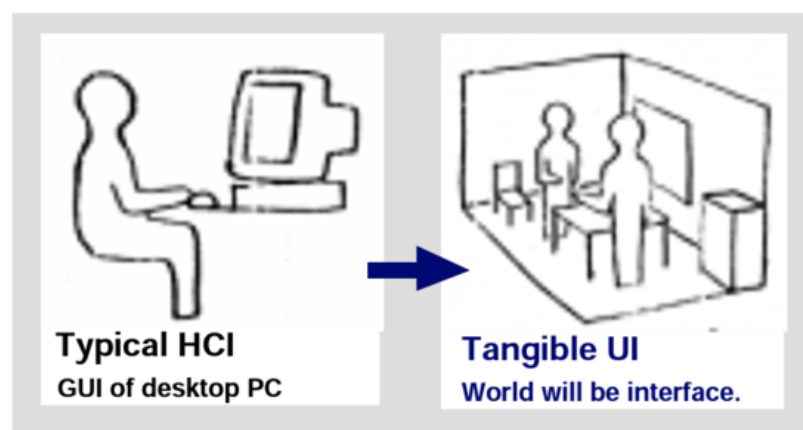


図 2.1: Tangible Bits の概念図 [4]



図 2.2: musicBottles[19]

(3) Reactable

図 2.3 に示す「Reactable」[20] とは、立方体や円錐型のブロックにユニークなマーカーを付与し、専用のテーブルに配置し操作することでシンセサイザーの様に音楽を生成できるインタラクティブメディアである。従来のシンセサイザーは鍵盤やボタン、そしてボリュームなどのシンプルなインタフェースで形成されている。しかし、入力に対するフィードバックは聴覚情報やディスプレイモニタに表示される視覚情報である。Reactable では、インタフェースとなるマーカー付きのオブジェクトをテーブルに配置し、位置や角度、他オブジェクトとの距離を変更することで、様々な音色やパターンを生成することができる。また、オブジェクトの位置にテーブル下部から、リアプロジェクションにより結果が視覚的にフィードバックされるため、オブジェクトを操作することで音による聴覚情報とプロジェクションによる視覚情報の変化で、どのブロックを操作するとどのような変化が発生するかを即時に判断する事が可能である。

(4) SmartSkin

図 2.4 の暦本らが提案する「SmartSkin」[21] は、静電容量方式を採用したパッチパネルインタフェースである。従来のタッチパネルにおけるセンシングシステムは、カメラや赤外光を用いるシステムが主流であったが、SmartSkin で採用された静電容量方式は、電極をグリッド状に敷いた入力面に指で触れることで、指とタッチパネル間に発生する微弱な静電容量の変化からタッチ位置を検出する方式である。reactable ではマーカの認識にカメラを用いているため、自然光や環境光によって認識精度に影響があるが、SmartSkin では静電容量方式を採用しているためその影響はない。これにより、これまで自然光や環境光の影響で設置を屋内に限定されていたタッチインタフェースを屋外に設置することも可能になる。



図 2.3: Reactable[20]



図 2.4: SmartSkin[21]

2.2.2 Natural User Interface

Natural User Interface(以降, Natural UI とする) は Tangible UI の概念に近く, 従来の CUI や GUI で行う操作をより直感的かつ人間の自然な動作や行為により, 操作を行うことを可能にするインタフェースの概念である. 製品化されている Natural UI デバイスとして, 1 章でも挙げた Kinect や LeapMotion, その他に Apple 社の音声アシスタント Siri[22] などが Natural UI に分類される. Natural UI では, 人間の動きや声をセンシングする事で, 動作や行動, 音声を分析し, 決められた行為が検出されることで入力としコンピュータを操作するインタフェースである. その入力として用いる行為は, 瞬発的な音声発声やジェスチャの他に, 継続的な動作やあるシチュエーションでの動作など, 人間の実環境下での動作を想定し設定することで, より自然な入力インタフェースとなり, コンピュータの存在を人間に意識させない操作感を提供する事が可能になる.

(1) g-stalt

図 2.5 は, Zigelbaum らが提案する NUI を動画像の操作に応用する手法「g-stalt」[23] である. g-stalt では, 3 次元空間に配置された複数の動画像をグローブ型デバイスを装着し, 60 種類以上あるジェスチャ操作を用いて, 選択, 閲覧, 再生などの操作を可能にする. 従来の動画像コンテンツやファイル操作はアイコンをマウスポインタで操作する GUI が主流であり, ファイル閲覧にはマウスの移動やスクロールホイールで 2 次元的に操作を行う. それに対し, g-stalt では 3 次元的に操作を行うジェスチャラル UI を用いることで, 操作対象となる動画像も 3 次元空間に配置することが可能になる. これにより従来のマウス操作では困難な, 三次元的な操作や, 複雑かつ豊富な操作方法を提供する事が可能になる.

(2) Corteza

Natural UI の一例として Brain Machine Interface(BMI) が挙げられる. BMI は人体の脳波を測定し分析することで, 被験者の集中度合いなどを計測し, それらパラメータからコンピュータを操作するインタフェースである. 図 2.6 は Guevara が制作した, 脳の活動を可視化しデジタルアートを作り出す「Corteza」[24] である. Corteza は, 視覚や聴覚から脳へ送られる電気信号を取得し, 体験者の精神状態, 集中力, 知覚などのパラメータからグラフィックを生成する. この作品では g.tec 社の BMI[25] を用いて脳波の計測をおこなっている. BMI を用いることにより, 体験者は自身が受ける外部刺激や集中状態を把握でき, その影響がどのようにグラフィックスへと可視化されるかを観察する事が可能になる.



図 2.5: g-stalt[23]



図 2.6: Corteza[24]

(3) ファウンド・イン・トランスレーション

音声認識や自然言語処理技術が発展した現在では、各社から音声アシスタントサービスが提供され、音声認識を用いた文字入力や、家電操作が主流になってきている。また、これら音声認識技術を用いた HCI 研究やメディアアートも多く提案されている。

図 2.7 は、チェンらが制作した「ファウンド・イン・トランスレーション」[26] である。室内中央に配置されたマイクに話しかけると、話者が発声した言葉を Google 翻訳を介して翻訳し、壁面に配置されたディスプレイに 23 カ国の言語で表示される。ディスプレイの大きさは表示される言語を使用している人口によって変化し、言語人口が多いと大きいディスプレイに表示される。



図 2.7: ファウンド・イン・トランスレーション [26]

2.2.3 Ambient User Interface

Ambient User Interface(以降, Ambient UI とする)とは、使用者やその周囲の環境をセンシングし、使用者に最適な環境になるように、室温や光量、風量などを調整する入出力インタフェースやその技術を指す。また、センシングした環境データを環境内にある物体やユーザが直感的に認識できる情報提示手法を用いて情報を提供するものも Ambient UI に分類する事ができる。

(1) MOSS-Xels

図 2.8 は、木村らが提案する植物を用いたディスプレイ「MOSS-Xels」[27]である。MOSS-Xels は、苔の水分を吸収すると開き乾燥すると閉じる反応を利用した緩やかな情報提示ディスプレイである。一般的な視覚による情報提示手法として液晶ディスプレイを用いる事が多いが、現代のデジタル化が進んだ社会では、このような液晶ディスプレイに表示された情報が環境に溢れ情報過多であるとも言える。MOSS-Xels は、そのような現代社会において、自然物である苔の緩やかな変化を用いて情報を伝達することで、自然環境に溶け込む新たな情報表現手法を提案している。



図 2.8: MOSS-Xels[27]

(2) Cyborg Botany

Sareen らが提案する「Cyborg Botany」[28] は、現代のディスプレイを中心とした人工的なコンピュータとのインタラクションを、自然界に存在する植物を用いたインタラクションへと再構築する手法を提案している。Cyborg Botany では、植物に流れる電気信号や反応機構を利用し、生きている植物を入出力インタフェースに用いることで、機械の存在を感じさせない自然な Ambient UI を提案している。図 2.9 で示すように植物を入出力タッチインタフェースに用いる事で、遠隔の相手とのコミュニケーションを図ることも可能になる。

(3) Ambient Fixtures

Dahley らは、建築空間の中で時間的な情報を繊細かつ美的に表示するための物理的なオブジェクトを用いた情報提示手法 [29] を複数示している。「Ambient Fixtures」は、コンピュー

タのデジタル情報を表示するディスプレイの代わりに、オブジェクトの形状、動き、音、色、光の変化により表現する。Ambient Fixtures では、素材の持つ自然な性質を利用して情報を出力することで、身体性を生かした美的な情報提示手法を提供する。図 2.10 は Ambient Fixtures の作例「Pinwheels」であり、複数の風車の回転速度がそれぞれ異なる環境情報を表示している。



図 2.9: CyborgBotany[28]



図 2.10: Pinwheels[29]

2.2.4 実世界指向インタフェースの有効性

本章では本研究の関連研究として、2.1 節にて HCI における実世界指向インタフェース研究の動向について、Tangible User Interface, Natural User Interface, Ambient User Interface の3つに分けて説明した。2.2 節にて、影を用いた実世界指向インタフェースの従来研究について述べ、どのような手法を用いて、影をインタフェースへ応用可能か説明し、2.3 節にて、従来研究における影を用いたインタラクション手法について説明した。

2.1 節で述べた Tangible UI 研究では、実世界の物体を操作する事で、その物体に紐づけられた仮想情報を操作することが可能である。アナログなインタフェースの様な入力と出力が直感的で理解が容易なコンピュータインタフェースが現在まで多く提案されている。これらの Tangible UI 研究の様に、物体を操作し情報を直接変更する操作体験を提供するインタフェースは、初めて操作するユーザでも直感的に操作でき、操作特性の理解も早いことから、有効的な操作手法であると言える。

自然な人間の動作や行動を入力インタフェースとする Natural UI では、コントローラとなる物体を用いず、ジェスチャや音声、脳波によるインタラクションが可能である。Tangible UI では我々が使い慣れたアナログな物体をインタフェースに用いる事で、直感的な操作を可能にする。また、Natural UI では、物理的なコントローラ特性を学習する必要がなく、普段使用する自然言語による音声入力や、身体ジェスチャを用いることで、ユーザが対人で行う様なコミュニケーション方法でコンピュータの直感的な操作が可能になる。そして、Ambient UI では人文学や自然科学から、我々人間の文化的背景に着目した UI や、自然物や自然現象を用いた UI が提案されている。我々が普段目にする自然物や自然現象をディスプレイとして用いる事で、コンピュータを感じさせない操作感や情報提示を可能にする点で、インタフェースとして有効的であると言える。

2.3 影を用いたユーザーインタフェース研究

2.3.1 影を用いたポインティングインタフェースに関する研究

武内らは、影のメタファーを利用したポインティングインタフェースにおける影の制約を緩和する手法 [30] を提案している。影の概念を用いたポインティングインタフェースは、会議などで複数人がコンピュータを操作する際に有効であるが、着座した状態で操作する事が想定されるため、移動することで光源との距離を調整し、影の大きさをコントロールする事が困難である。武内らの手法では、実際の光源とユーザの位置関係から生成される影よりも近い位置に仮想スクリーンを配置した上で、そこに生成される影を計算し実際の投影面にコピーする。これにより、ユーザが移動して影の大きさを調整せずとも投影面の大きさに対して最適な大きさの影を生成し、ポインティングインタフェースとして操作する事が出来る。

宮本らは、ショッピングモールなどの商業施設に設置されるデジタルサイネージ広告を想定した、影のポインティングインタフェース [31] を提案している。宮本らの調査によると商業施設でのサイネージ広告の多くは、インタラクティブ性の無い広告コンテンツが表示され、有効利用されていない事がわかった。そこで、宮本らの提案手法では図 2.11 のように、壁面に対するプロジェクションにより広告媒体を表示し、壁面前に立つユーザの影をポインティングインタフェースとして用いる事で、エンターテインメント性のあるインタラクティブな広告を表示可能にする。

また、宮本らは影の特性を利用した実世界指向インタフェースとして、博物館や資料館などの公共施設での利用を想定した、オブジェクトの影をポインティングインタフェースとする手法 [32] を提案している。この手法では、直接触ることの出来ない貴重資料などケース内に展示されている展示品に対して、ケース外からオブジェクトの影を投影し、資料にポインティングする。これにより、図 2.12 の様に展示品に対しインタラクティブ情報提示が可能となり、かつ展示物に触れることなく展示物の情報を選択可能になる。

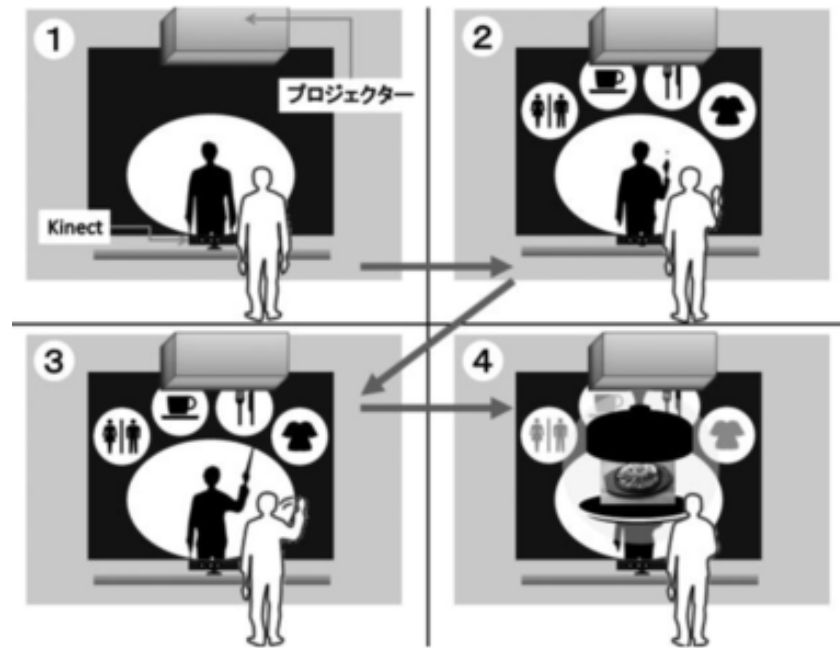


図 2.11: 影を用いた指差し操作によるデジタルサイネージ [31]

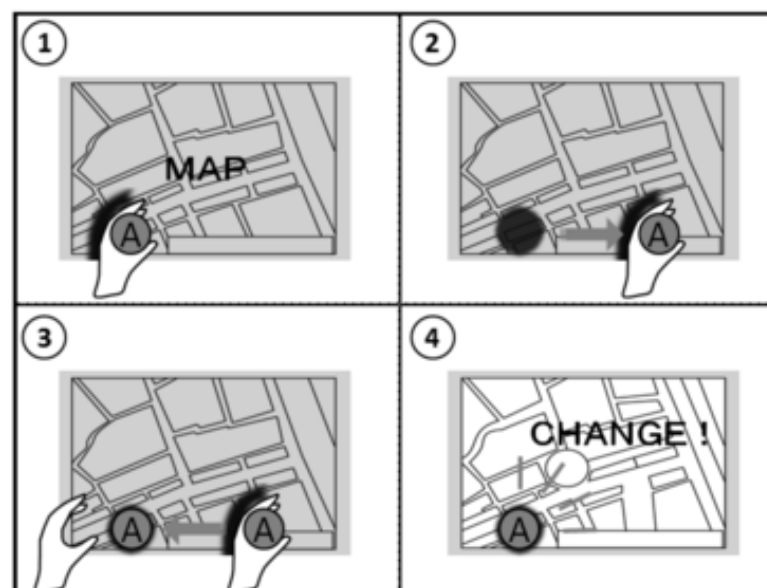


図 2.12: 影の特性を利用した実世界指向型インタフェースのデザイン [32]

2.3.2 影を入力とする物体の形状生成に関する研究

Mitra らは、3 枚のシルエット画像を入力として、シルエット形状の影絵を三方向に一度に投影可能な 3D オブジェクトを生成する「Shadow art」[33] を提案している．従来のシャドーアートでは、複数物体の形状と光源との位置関係から影を作り出すが、Mitra らの提案手法では、生成したい影のシルエット形状を入力とする事で、影を発生させる 3D オブジェクトを作成可能になる．また、図 2.13 のように入力するシルエット形状は最大 3 つまで入力可能であり、出力される一つのオブジェクトから同時に三つの影絵を作り出すことが可能である．

村上らは、影のシルエット画像を入力とした、浮遊物体を用いたインタラクティブなシャドーアート生成システム [34] を提案している．村上らのシステムでは、ユーザが浮遊物体を用いたシャドーアートを制作する際に、作成したい影のシルエット画像を入力することで、影の生成に必要な浮遊物体の個数や最適な位置を計算し、図 2.14 のように 3D 空間上でシミュレートする．



図 2.13: Shadow art[33]

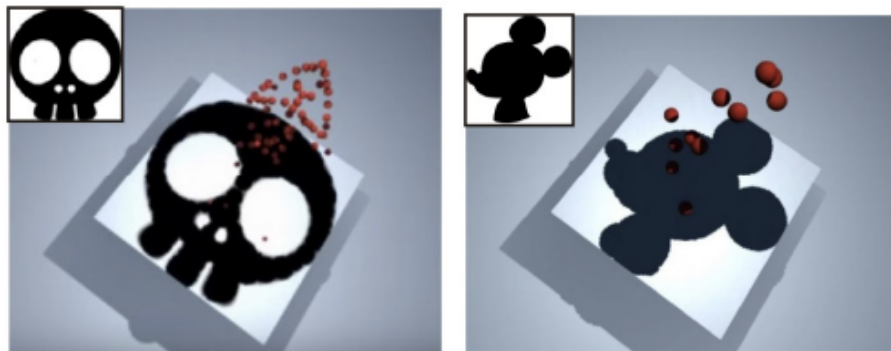


図 2.14: 浮遊物体を用いたインタラクティブなシャドウアート生成システム [34]

2.3.3 影をインタフェースにした照明操作に関する研究

Anrys らは、様々な照明効果を再現する近拡散オブジェクトのための照明設計フレームワーク [35] を提示している。光源は物体の周囲の固定位置に配置され、既存のデジタル画像処理ソフトウェアを用いて、対象物の写真上に希望する照度分布を描き込む。この描画された照明を利用して、実物の陰影が所望の照度分布になるような光量を決定する事が可能になる。

Noh らは、コンピュータ制御された照明の配列を用いて、実際の部屋の照明分布を設計可能にする AR ベースのペインティングインタフェース「Lighty」[36] を提案している。図 2.15 のようにユーザは、室内に設置されたカメラで撮影された画像にペイントすることで、部屋の照度分布を指定する事ができる。描画結果は、カメラ画像上に目標とする照度の等高線として重畳表示される。照明の向きを変えられるアクチュエータライトを用いることで、より正確かつ効率的に要求された照明条件を生成することが出来る。

Pellacini らは、仮想空間内でのオブジェクト、ライト、影に相互関係性を持たせ、影を操作することで、その影を持つオブジェクトの位置を変化させたり、ライトとオブジェクトの距離を変化させるインタフェース [37] を提案している。3D 環境で影を任意の位置に移動させるには、3D オブジェクトやライトを移動させ、その位置関係を考慮しなくてはならない。この研究では、3D 環境での影の配置を直感的に操作できるように、図 2.16 のようにマウスで影をドラックさせ移動させたり、拡大縮小させることができる。その操作によってオブジェクトやライトは、影の変化に対応した位置に相互に移動する。

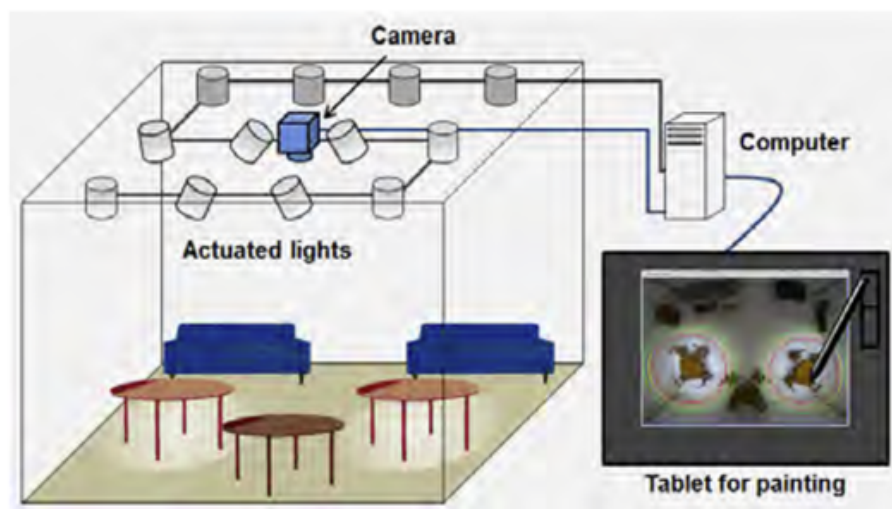


図 2.15: Lighty[36]

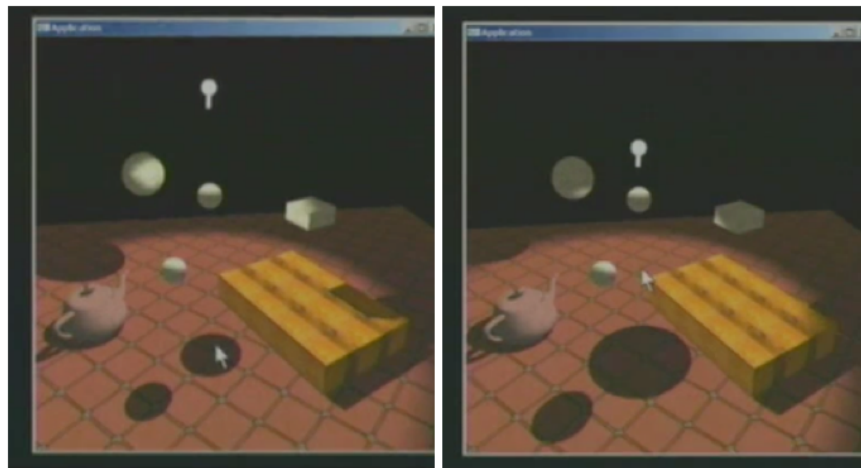


図 2.16: A User Interface for Interactive Cinematic Shadow Design[37]

2.4 影を用いたインタラクションに関する研究

2.4.1 身体影を仮想影で拡張したインタラクション

本項では「身体影」を「ユーザの体から伸びる影、またユーザの影を表現した映像」と定義し、「仮想影」を「CG で作られた影の映像」と定義する。

蓑毛らは、マルチプロジェクションを用いてユーザの身体に対し二つの影を作り出すインタラクティブメディア [38] を提案している。蓑毛らの手法は、左右からのマルチプロジェクションによって、図 2.17 の様に、一方に生成された影の上に補色となる CG 影を投影する事で影の内部に映像をプロジェクションする。左右のプロジェクタからプロジェクションされるため影が二つでき、その二つの影に映像を投影する事が可能である。このシステムにより、モノクロな身体影にカラフルな映像を投影する事が可能となり、カラフルな影を用いた身体表現や、エンターテインメント性のある広告などに利用する事が可能になる。

三輪らは、遠隔地にいるユーザ同士の身体影を互いの空間に映し出すインタラクティブなコミュニケーションシステム [39] を提案している。従来の身体影を用いたインタラクティブシステムで行われるコミュニケーションは、同じ空間にいるユーザ同士が互いの身体影を介する手法が多い。三輪らはの手法では、遠隔地にいるユーザの身体影を互いがいる空間でそれぞれプロジェクションし、自身の身体影と遠隔にいる相手の身体影を同一の空間に映し出す手法である。これにより、遠隔にいるユーザの動きを模した仮想の身体影とのコミュニケーションが可能になり、影を用いたテレプレゼンスなど CSCW への応用が可能になる。

図 2.18 は岩崎らが提案する、物体の仮想影と身体影とのインタラクション手法 [40] であ

る。岩崎らの手法では、プロジェクターを光源として人や物から生成される実影と、CGで生成された仮想の影とのインタラクションを実現している。ユーザは自分の影を虫かごの影に重ねることで、仮想影の蝶が虫かごから飛び出し、自分の影と触れ合う映像体験を可能にする。この手法では、身体と背景の位置を赤外線カメラでセンシングし、背景へ投影される影を計算する事で、実際の身体影と仮想の影とのインタラクションを可能にしている。



図 2.17: Transforming your shadow into colorful visual media[38]



図 2.18: 実物の影による仮想の影とのインタラクション [40]

2.4.2 影ディスプレイとのインタラクション

五十川らは、マルチプロジェクションを用いて自身の影に映像を投影し、投影した映像とのインタラクションを可能にするテーブルトップインタフェース [41] を提案している。五十川らの手法では、テーブルトップインタフェースの上部と下部からマルチプロジェクションを行うことで、ユーザが手をかざした際の影などに映像を投影する事が可能になる。また、使用するテーブルトップインタフェースには、FTIR タッチパネルを用いる事でユーザのタッチ入力を可能にしている。これにより、影に投影されたコンテンツに対して、ユーザのタッチやジェスチャ操作による影内部映像とのインタラクションが可能になる。

阪口らは、赤外光と赤外線カットフィルタを複数用いる事で、物体の影を変化させるインタラクション手法 [42] を提案している。阪口らの手法では、人間の目には見えない赤外光と赤外線カットフィルタを用いる事で、物体の不可視の影をセンシングする。また異なる波長の赤外光とカットフィルタを複数用いる事で、波長によって生成される不可視の影を選択する事が可能になる。従来の手法では、カメラやマーカなど大きな装置を用いたシステムが多いが、阪口らの手法は、比較的簡素なシステム構成で、影の出力を変化させる事が可能である。

石山らは、物体の影を切り離しインタラクション可能にするメディア装置 [43] を提案している。石山らの手法では、投影面となるディスプレイ上に物体を配置し、上部プロジェクターの光により影を発生させる。その影は一度ディスプレイを通過し、下部の角度調節可能な鏡によって反射され、実体の少し手前に映し出されることにより、影を切り離した感覚を表現している。図 2.19 の様に、切り離した影に対して、映像を付与することで、実際の影を使ったインタラクションを行うことができる。

岩崎らは、実体の影内部に投影された映像とユーザーの影を用いたインタラクションを実現するシステム [44] を提案している。このシステムは、マルチプロジェクションを使ってディスプレイとなる実体正面に小物体の影映像を投影し、実体の影内部には小物体映像を投影するという逆転した環境を作り出し、ユーザーの影とのインタラクションを行う作品である。この作品では、図 2.20 のようにディスプレイに映されるはずの小物体がディスプレイの影に表示され、小物体の影がディスプレイに表示される、影と表示物との逆転の関係が特徴的である。また、図 2.21 のように小物体の仮想影とユーザーの実影とのインタラクションに加え、ディスプレイを傾けることによって内部の映像にもその影響を与えるインタラクションが可能である。



図 2.19: Bounsight Shadow[43]



図 2.20: 仮想の影とユーザーの実影とのインタラクションの様子 [44]



図 2.21: ディスプレイを傾けることで仮想の影とのインタラクションを行う様子 [44]

2.5 従来研究と本研究の差異

従来の影を用いた実世界指向インタフェース研究では、影の伸縮性を用いたポインティングインタフェースへの応用や、実空間でシャドーアートを作成する際の物体形状のシミュレーション、光源を操作し影の大きさや位置を変更するアプリケーションが提案されてきた。影をポインティングインタフェースに用いる研究では、CGでプロジェクションされた身体影により、ユーザの影が拡張されることで、選択対象をポインティング可能になる。本研究では、物体の影を拡張する事で、選択し操作を可能にする。また、影を操作する際はユーザの身体影ではなく、ユーザの指先で直接触れる事で操作を行う点で差異が有る。影から物体形状を作成する研究では、シルエット画像を入力することで、その影を射影するオブジェクト

トを生成可能である。本研究で提案する影を用いた実世界指向インタフェースの応用例でも、影への入力により 3D オブジェクトを作成可能にする。先行研究では、影の代わりにシルエット画像を入力とするが、本研究では、実世界の影を直接操作し入力可能な点で差異がある。光源を操作し影の大きさや位置を変更する研究では、実世界の照明機材を操作する事で、CG では無い実影を変更可能である。本研究でも、実影を変更可能にする点で類似しているが、先行研究では、照明機材のライティングを操作し影を変更する点に対し、本研究では、影を直接操作し影の位置や大きさを変更可能な点に差異がある。

従来の影を用いたインタラクション研究では、CG による仮想影で身体影を拡張する研究や、プロジェクションにより影の内部に映像を投影しディスプレイとして拡張する研究が提案されている。身体影を拡張する研究では、CG によって作成された仮想影をユーザの影にプロジェクション手法や、ユーザの影をトラッキングして仮想影とのインタラクションを可能にする手法がある。これによりユーザは普段見慣れた自身の影が色鮮やかに変化する体験や、仮想的物体や生物との影を介したインタラクション体験を得ることができる。また、影をディスプレイに拡張する研究では、物体の影内部に映像を投影する手法によって、物体を操作し影内部の映像とのインタラクションが可能になる。これら先行研究では、ユーザの入力に対する出力インタフェースとして、CG によって作成された仮想影を用いることで、影の形状変化や、影同士が影響し合う表現など、実世界の影では不可能な影の映像表現を可能にしている。これに対し、本研究では実影をインタフェースとして操作し、その影を持つ物体の変化で表現を行う点に差異が有り新規性を有する。また、影に対しての操作で、物体そのものが変化することによって、インタフェースである影にも、その結果が反映される影響の循環を生み出し、それをインタラクションに取り入れた点も新規性といえる。本研究では、このような影から物体へ、そして物体から影への物理的変化の循環を利用することで、コンピュータグラフィックスなどを一切使用せず、実世界における物理的変化のみでユーザーに情報を提示する点や、影を入出力インタフェースとして使用する点に、インタラクティブシステムとしての特徴がある。

第3章 影を用いた実世界指向インタフェース

本研究の基礎となる、影を用いた実世界指向インタフェースについて、影をユーザーインタフェースに用いるための概念とその概念を具体化するために実装した「影ユーザーインタフェース (KUI)」について説明する。

本章では、まず本研究で扱う影の特徴について説明し、影を用いた実世界指向インタフェースとして提案する KUI について概要を述べる。次に、KUI の新規性、ユーザーインタフェースの特徴を述べた後、3.5 節にて、KUI の基礎となる三つのシステムを提案し、その実装方法について述べる。これら三つの基礎システムでは、システムそれぞれの影をユーザーインタフェースに用いる際に想定される操作方法と、操作による物体の動作について、三つのインタラクションに分類し説明する。システムを分類し、影をインタフェースに用いる際の最小構成要素を示すことで、インタフェースとしての汎用性も示されると共に、インタラクティブシステムへの応用性が向上すると考えられる。

そして、最後にこれら基礎システムを統合した影への複数操作による物体の 3 次元移動システムについて、インタラクション手法と実装方法について述べる。

3.1 影の性質

影は物理的現象として、遮蔽物となる物体が光を遮った結果発生する暗い領域であり、光を遮蔽する物体の形状と光源との位置関係、投影面の形状によって、その影の形状も変化する。このように影を物理的現象として定義すると、光を遮蔽物で遮った結果であるが、光が存在する場所であれば、必ず影も存在する点や遮蔽物の形状を反映した影が生成されることから、心理学 [45] や哲学 [46] にて影のメタファーが用いられることがある。また、影のメタファーを用いた文学作品 [47] が古くから存在し、現在の日本の漫画やアニメでも影のメタファーを用いたストーリーは多い。このようにして、古くから影はメタファーとして用いられ来たことで、影という物理現象が持つ文化的な意味合いが理解され浸透してきている。

そして、影のメタファーを用いたアート作品も多く存在する。図 3.1 はアーティストの Wiegman が制作したシャドーアート [48] である。シャドーアートは、光を当てる前の遮蔽物の形状からは予想できないような影の形状が生成される点で鑑賞者に驚きを与える事がで

きる。形状を生成するための遮蔽物たちにメッセージ性を持たせることで、投影される影とのギャップも表現される点で人気の作品である。また、伝統芸能として図 3.2 のインドネシアのワヤン・クリ [49] という人形の影で影絵を行う手法が存在する。これら影を使ったアート作品や伝統芸能では、光と遮蔽物となる物体があれば、影を生成できる点や、光と遮蔽物、スクリーンとの位置関係を調整する事で影の大きさや形状も変化させられる点で、古くから表現手法の 1 つとして用いられてきた。

映像技術の発展した現代では、図 3.3 のようにプロジェクタを用いて、コンピュータグラフィックス (CG) で生成される影を物体の実影上にプロジェクションする事で、実際の影では生成されないような形状の影をプロジェクションする手法 [50] を用いた作品が発表されている。また体験者の影や身体形状をトラッキングする事で、図 3.4 のようにプロジェクションされる CG とそこに映し出される体験者の影によるインタラクションを可能にする手法 [51] もインタラクティブアートでは多様されている。このように影は物理的現象としての性質と共に、文化的性質を持つことで、情報技術の発展した現代でもインタラクティブアートやメディアアートのコンテンツに取り入れられ、影のメタファーを利用した作品の解釈や、投影された影を自身の影と認識して操作するインタラクションに用いられている。



図 3.1: Shadow dancing[48]



図 3.2: ワヤン・クリ [49]



図 3.3: Parade[50]



図 3.4: Immersive Shadow[51]

3.2 KUIについて

KUIでは、実世界において物体が光を遮ることで影が発生するという従属関係に着目し、それを逆説的に捉える。それにより、実世界での物体を動かすことで影が変化するという現象を、KUIによって影を操作することにより物体が変化するという新たな関係性を作り出し、UIとして利用する。言い換えると、実世界において物体から影への一方向であった関係性に、KUIにより相互的关系を与え、互いが影響し合う関係性を作り出す。KUIでは、影に対しユーザーがジェスチャ操作を行うことで、影に与えられた操作によって物体に変化を与えることができる。KUIでは影への操作で物体の位置や動きに対する操作が考えられる。そこで本稿では、KUIの基礎システムとして、①ピンチジェスチャによる物体の垂直移動システム、②タッチジェスチャによる物体の移動停止システム、③ドラッグジェスチャによる停止物体の水平移動システムの三つのシステムを3.5節にて提案する。これら三つの基礎システムは、KUIで想定される影へのジェスチャ操作に対する物体の動作をシンプルなインタラクションによって表現する。そして3.7節にて、提案した基礎システムを複数組み合わせる事で、影へのジェスチャ操作による物体の3次元移動システムを提案する。

3.3 KUIの新規性

3.3.1 インタラクションの新規性

KUIでは実影をインタフェースとして操作し、その影を持つ物体の変化で表現を行う点に新規性を有する。また、影に対する操作により物体そのものが変化することによって、イン

タフェースである影にも，その結果が反映される影響の循環 (図 3.5) を生み出し，それをインタラクションに取り入れた点も新規性を有すると言える．KUIでは，このような影から物体へ，そして物体から影への物理的変化の循環を利用することで，コンピュータグラフィックスなどを一切使用せず，実世界における物理的変化のみでユーザーに情報を提示する点にインタラクティブシステムとしての特徴がある．

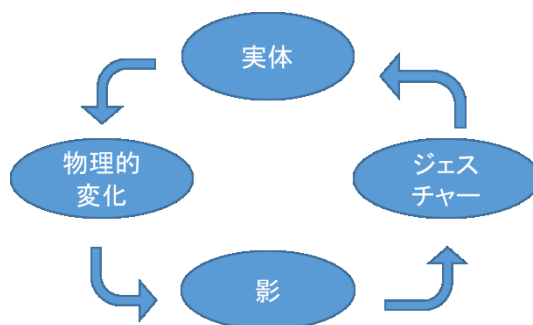


図 3.5: 影への操作による影響の循環

3.3.2 ユーザーインタフェースとしての特徴

従来の人工物に対する操作では，コントローラーなどの UI や，ジェスチャラル UI を使用する方法が挙げられる．KUI では，コントローラーなどの物理的な UI は使用せず，スマートフォンに使用される直感的なジェスチャラル UI に基づく操作方法を使用する．また，プロジェクタなど使用せず，実世界の物理変化のみで情報提示を行う点で，ジェスチャラル UI としての特徴を有する．KUI の操作にスマートフォンで用いられるジェスチャラル UI[52] を用いる事で表 3.1 の様な操作で物体とのインタラクションが可能になる．

表 3.1: KUI による影への操作と物体の動作

操作名	影への操作	物体の動作
タッチ	影の選択，影を押さえる	物体の選択，移動の停止
ドラッグ	影の移動	水平方向の移動
ピンチイン	影の縮小	下方向の移動
ピンチアウト	影の拡大	上方向の移動
スワイプ	影を指定方向へ流す	指定方向への移動，または回転
ローテート	影の回転	物体の回転

3.4 本研究における KUI の位置付け

本研究では、影を用いた実世界指向インタフェースの基礎概念として KUI を提案し、KUI のシステム設計、インタフェース概念、KUI が可能にする複数のインタラクション、実装方法について示す。3.3.2 項にて、表 3.1 で示す KUI の操作とそれに伴う物体の動作では、KUI で実現可能な操作例である。本稿では、この操作の中から影の特性を活かすことのできる、ピンチジェスチャとタッチジェスチャ、ドラッグジェスチャの三つの操作に対するインタラクション手法を提案し実装方法について述べる。そして、KUI の応用例として、影のメディアとしての性質を拡張するインタラクティブメディア、3D モデリング手法とデジタルファブリケーション手法、影の芸術表現の三つの手法を提案する。

これにより、実影を実世界指向インタフェースとして用いる際に KUI の概念をユーザーインタフェースとして使用する事で、HCI 分野での影を用いたインタラクション研究や、芸術分野での影を用いた表現に貢献する事ができると考える。また、その応用手法として三つの手法を提案することで、影を実世界指向インタフェースとして用いる有効性を示す。

3.5 影を用いた実世界指向インタフェースにおける 基礎システムの提案

3.5.1 ピンチジェスチャによる物体の垂直移動システム

ピンチジェスチャによる垂直移動システムでは、影に対してピンチイン、ピンチアウト操作を行う。ピンチイン、ピンチアウトはスマートフォンの操作では、画像などの拡大縮小に使われる。影を拡大縮小させる場合、物体の大きさが変化するか、光源に対して物体の距離が変化するかの 2 通りの動作が考えられる。光源と物体の距離によって影が伸張するという特性を生かすことで、KUI の特徴である、物体の変化による影への影響の循環が、より強調され则认为。そこで本研究では、光源に対しての物体の移動を採用し KUI の実装例としてシステムの制作を行う。図 3.6 のように、ピンチアウトという拡大の操作に対しては、物体を上昇させることで影を拡大し、ピンチインという縮小の操作に対しては、物体を下降させることで影を縮小する。図 3.7 にピンチジェスチャによる物体の垂直移動システムを示す。

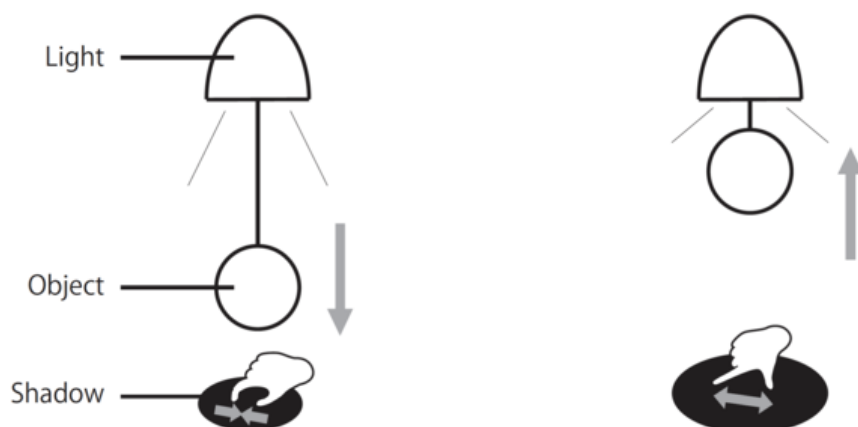


図 3.6: ピンチジェスチャによる垂直移動システムの操作概念



図 3.7: ピンチジェスチャによる垂直移動システム

3.5.2 タッチジェスチャによる移動停止システム

タッチジェスチャによる移動停止システムでは、移動している物体の影に対してタッチ操作を行い、物体の移動を停止させるインタラクションを可能にする。図 3.8 の様に、移動している影を指で抑えることで、相互的関係を持つ物体の移動を停止させ、影から指を離すことで、再び物体の移動を開始させる。光源は上部に配置され、その中心から一定の距離に物体を配置し、光源を中心に円運動させる。それにより、光源を中心にした物体との距離と角度を保ちつつ円運動させ、生成される影の大きさを一定に保つ事が可能になる。また、影の

大きさが一定になることで、影に対してのタッチ操作が容易になる．図 3.9 に、タッチジェスチャによる移動停止システムを示す．

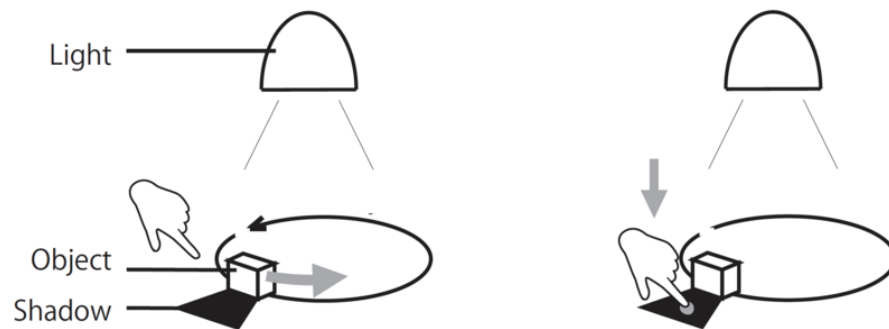


図 3.8: タッチジェスチャによる移動停止システムの操作概念

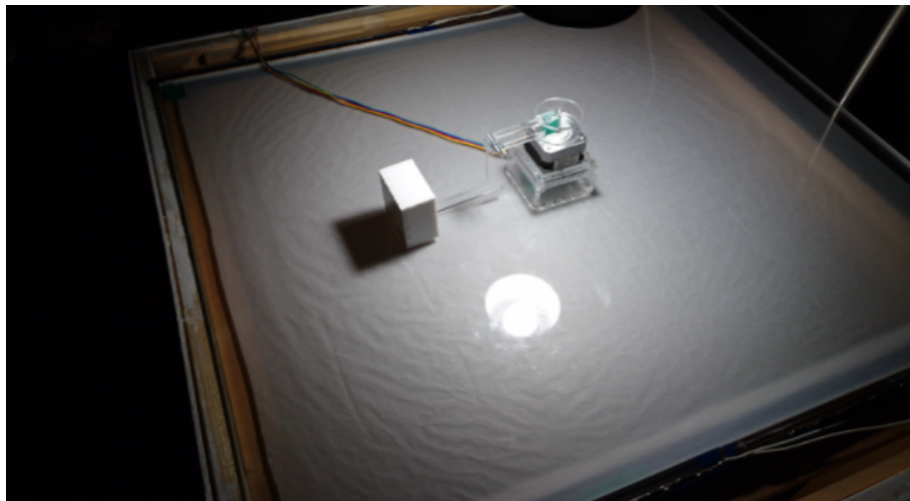


図 3.9: タッチによる物体の移動停止システムシステム

3.5.3 ドラッグジェスチャによる物体の水平移動システム

ドラッグジェスチャによる物体の水平移動システムでは、物体の影をドラッグする事で、物体の水平移動を可能にする．スマートフォンではドラッグジェスチャはアイコンなどを移動させる際に使用されるが、KUI ではこの操作を影をドラッグし垂直方向に移動させる操作として用いる．物体が移動する事で、光源との位置関係が変化し、インタフェースとしての影の操作面積も変化する事が予想される．操作面の形状が変化するると操作が困難になるため、影の形状と大きさを一定に保つ必要がある．そこで、本システムでは物体を宙に浮か

せ，物体の上部に光源となる照明機器を配置し，物体の移動に合わせ照明機器も移動させる事で，インタフェースとなる影の大きさと形状を一定に保つ．

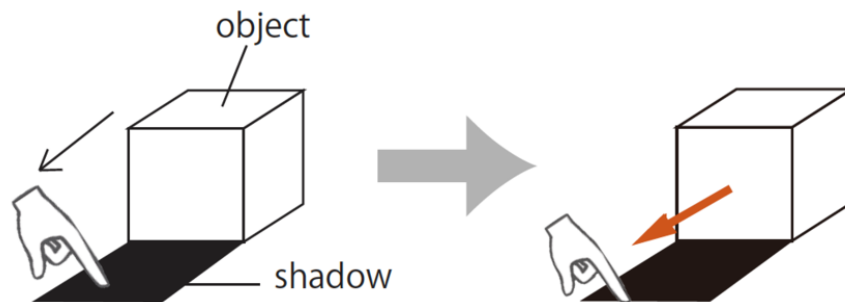


図 3.10: ドラッグジェスチャによる水平移動システムの操作概念

3.6 影を用いた実世界指向インタフェースにおける基礎システムの実装方法

3.6.1 影へのタッチ検出

前節で提案した KUI の基礎システムの実装において，影へのジェスチャを検出するため，ユーザの指が影内部の領域に触れているか検出する．影へのタッチ検出には，タッチパネルを用いて検出を行う．タッチパネルの方式には，FTIR(Frustrated Total Internal Reflection) 方式 [53] のタッチパネルを採用する．本研究で制作する FTIR タッチパネルで使用する機材を以下に示す．

- ・ 5mm 赤外線 LED 960nm [OptoSupply OSIR5113A]
- ・ WEB カメラ [BUFFALO BSW20KM11BK]
- ・ 可視光フィルタ [FUJIFILM FUJI FILTER OPTICAL IR 78]
- ・ 35mm アクリル板 [透明アクリル]
- ・ トレーシングペーパー

FTIR 方式は，図 3.11 の様にパネル側面に赤外 LED を配置し，パネル内部に赤外線を照射する事で，赤外線はパネル内部で全反射し，外部に漏れることなく内部に留まる．パネル上部から指でタッチすることによって，全反射している光が拡散光としてパネル下に透過する．図 3.12 の様に，透過した赤外線を赤外線カメラによって観測することでタッチした位置を検出することができる．FTIR タッチパネルは，赤外線カメラで指の位置をトラッキングす

るため、設計する際に形状や大きさの変更が容易であり、システム毎に異なる大きさの操作スペースが必要であるため、本研究では FTIR 方式を採用した。FTIR タッチパネルでは、赤外線カメラでキャプチャした指のタッチ画像を画像処理を行い、指の座標を計算する。画像処理は、グレースケール変換、平滑化、2 値化、輪郭抽出、重心検出の手順で行い、タッチされた指の本数と各指の中心座標を求める事ができる。図 3.13 に、実際に画像処理を用いた際のタッチ検出の動作を示す。

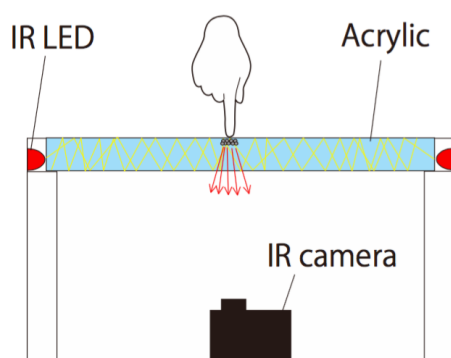


図 3.11: FTIR タッチパネルの構造図

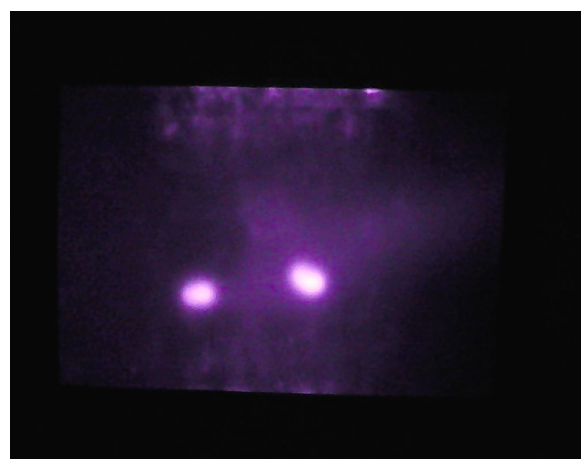


図 3.12: FTIR にてキャプチャした
タッチ画像

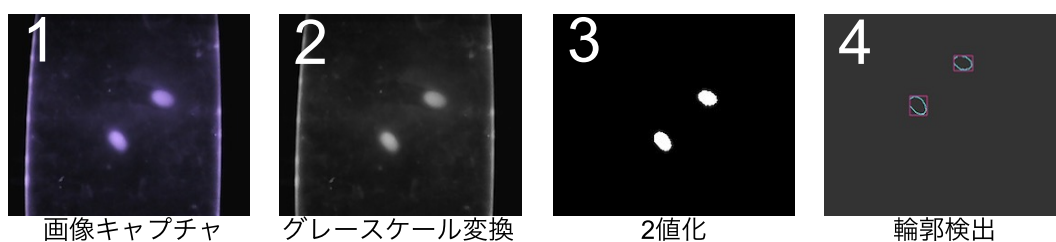


図 3.13: タッチ検出を行なう画像処理の手順

3.6.2 ピンチジェスチャによる物体の垂直移動システムの実装

(1) ピンチジェスチャ判定

垂直移動システムでは、FTIR タッチパネルによって指先を検出した後に、ピンチイン、ピンチアウトのジェスチャー判定を行う。図 3.14 の様に、あらかじめ物体の移動距離を定

めることにより、影の中心座標、影の最大直径、最小直径を計測することができる。計測した影の最大直径、最小直径をプログラム内部で保持し、赤外線カメラと画像処理によって検出される指の座標二点が影の直径内部にあるか判定する。影の直径内部にある場合、指座標二点間の距離の変化量に応じて、物体を垂直移動させる。図 3.15 は、本システムで使用する FTIR タッチパネルの設計図である。図 3.15 内の青い表示はアクリル板を示し、赤い表示は赤外線 LED を示す。

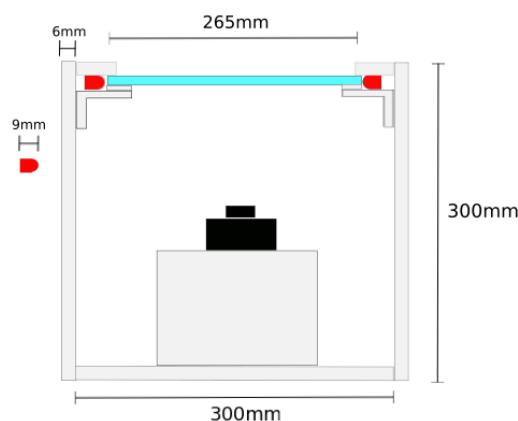
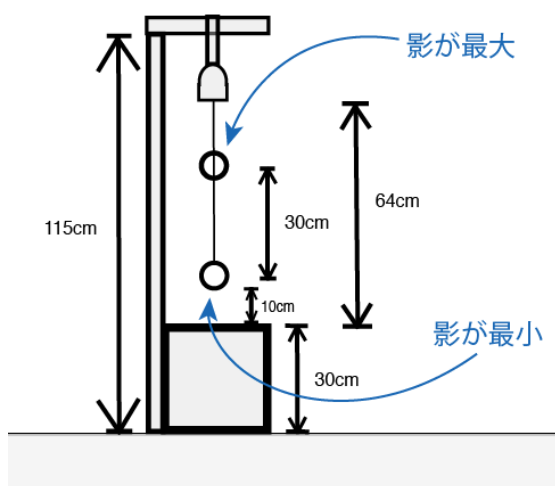


図 3.14: 物体の垂直移動システムにおける
物体の位置関係

図 3.15: 垂直移動システムの FTIR 設計図

(2) 物体の垂直移動機構

物体の垂直移動には、サーボモータ (KONDO KRS788 HV) を用いて、二本の指の二座標間の距離の変化量に応じて回転角度を制御する。マイコンボード (Arduino UNO R3) でサーボモーターを制御し、巻き取り機にて糸を巻き取ることにより移動を行う。巻き取り機の直径は、物体の移動距離 30cm を円周として計算し、直径を 19cm とする。巻き取り機の素材にはスチレンボードを使用し、軽量化することにより、サーボモーターへの負荷を軽減する。影の生成には LED ライトを使用し、物体には直径 8cm の発泡スチロールの球体を使用する。物体の素材に軽い発泡スチロールを使用することで、モーターへの負荷を減し、振動による物体の振り子運動も抑えることができると考えた。影の大きさは、物体の位置と移動距離によって決められる。影の大きさが最小の時の物体の位置は、光源から最も離れた位置にあり、かつ操作面となるパネルに最も近い位置にあることになる。そのため影を操作するユーザの手に当たらない高さに物体を配置する。また影の直径が最大するとき、操作面より

大きくならない様制限を設ける．物体を操作面から 10cm の高さに設置した際の影の最小径が 8.5cm であり，影の最大径は，自身の親指と人差し指でピンチアウトした際の長さを参考に 18cm とする．制作したシステムのプロトタイプを図 3.16 に示す．下部に位置するボックスは FTIR パネルであり，上部に位置するボックスは巻き取り機の機構と光源となるライトを収納するために設置した．図 3.17 に操作時の様子を示す．



図 3.16: ピンチジェスチャによる
物体の垂直移動システムのプロトタイプ

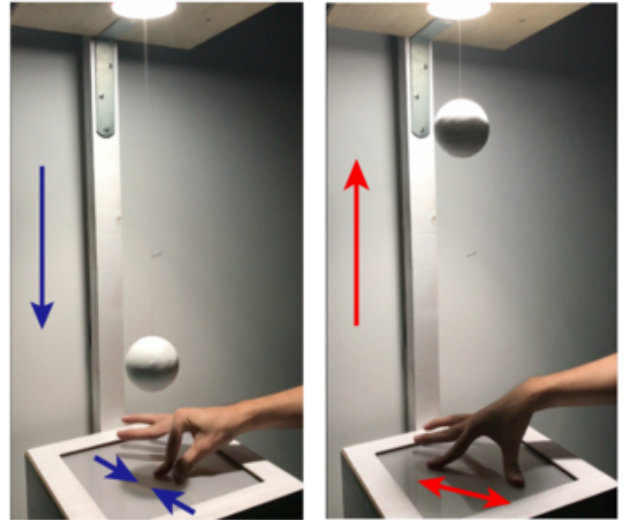


図 3.17: ピンチジェスチャによる物体の垂直
移動システムの操作の様子

3.6.3 タッチによる移動停止システムの実装

(1) 移動物体の影に対するタッチジェスチャ判定

移動物体の影に対するタッチ検出は，円周移動させる物体の底に赤外線 LED を取り付け，赤外線カメラでトラッキングする事で，物体の位置を取得する．光源が配置される中心位置と物体の位置から影の大きさを計算し，プログラム内で仮想の影領域を設定する．操作面にタッチした位置が影領域内であれば，モータを停止させ，指が離れた瞬間にモータを動作させる．

移動停止システムの FTIR は，上下移動システムで制作した物を基に制作を行う．移動停止システムでは，物体を円周移動させるための操作面の広さと，実体の影の領域を確保するため，縦 650mm 横 550mm 厚さ 5mm のアクリル板を操作面に使用する．操作面を拡大したことから，図 3.18 の様に枠組みの大きさと高さもそれに伴い設計する．厚さ 5mm のアクリル板を使用することで，枠組みの拡大による，板を押した時の撓みを抑える事ができる．

図 3.18 内の赤い表示は赤外線 LED アレイを示し、緑の表示はアクリル板を支えるフレームを示している。制作した移動停止システムの FTIR が図 3.19 である。

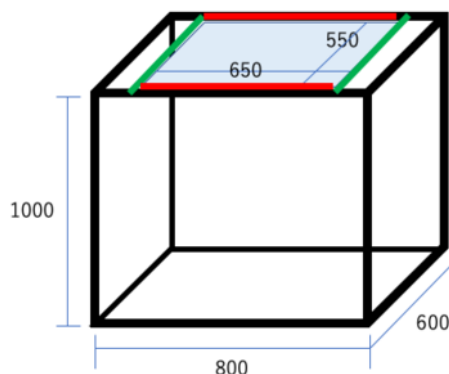
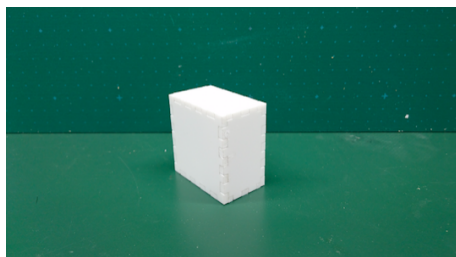


図 3.18: 移動停止システムの FTIR 設計図 図 3.19: 実際に制作した移動停止システムの FTIR

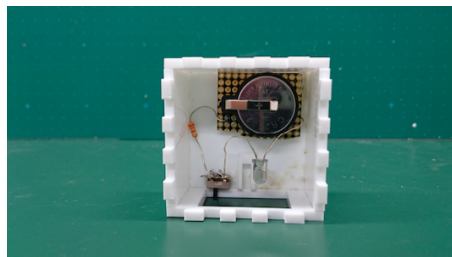
(2) 物体の円周移動機構

移動停止システムでは、影の生成に LED ライトを使用し、物体には図 3.20(a)(b) の縦 5cm 横 5cm 高さ 3cm の長方形の物体を使用する。この物体は中に赤外線 LED と電池が収納されており、スイッチで赤外線 LED を点灯できる。物体の底面は赤外線をカメラで観測できるようにくり抜かれている。モータに固定用の台座を取り付け、パネル中央に配置し、垂直上方向に光源用の LED ライトを配置する。実体に回転移動をさせるため、図 3.20(c) のようにジョイントを取り付けモータと実体を連結させる。モータの真上に光源があることで、回転している実体の影の大きさは一定に保たれる。物体の移動は、ジョイントで連結させたステッピングモータ (SM-42BYG011) を Arduino とステッピングモータードライバ (Strawberry Linux:L6470) で制御して移動させる。

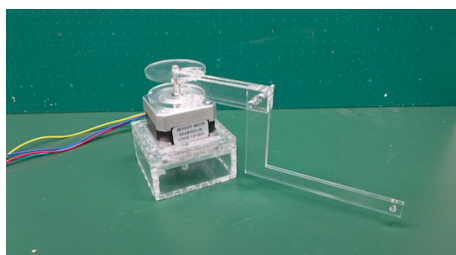
図 3.21 に移動停止システムのプロトタイプを示す。FTIR のボックス寸法は縦 600mm 横 800mm 高さ 1000mm であり、内側に赤外線カメラや、PC などの機材が収納される。上下移動システムのようなライトを収納する設計はせず、環境に応じたライトの外付けが可能となっている。また、ライトの高さ調節が可能となっているため、影の大きさを変更することができる。ステッピングモーターの台座の底面中央には赤外線 LED を取り付ける穴が設けられ、赤外線カメラでモーターの位置を検出することが出来る。図 3.22 に、操作時の様子を示す。



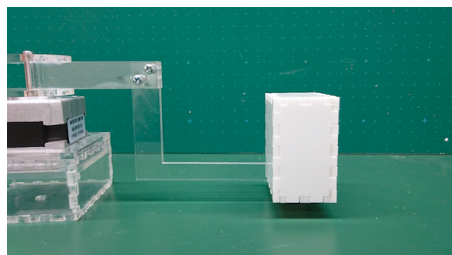
(a) 物体の斜視図



(b) 物体の内部構造



(c) モータとジョイント

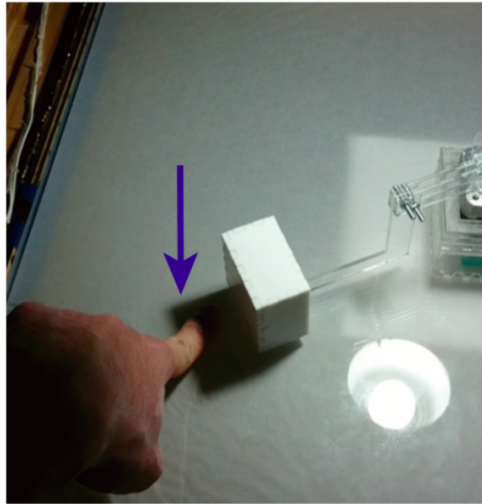


(d) ジョイント装着時の物体

図 3.20: タッチによる移動停止システムに用いる物体の機構



図 3.21: 移動停止システム正面図



(a) 物体がタッチジェスチャで停止する様子



(b) 物体が移動している様子

図 3.22: 移動停止システムの操作の様子

3.6.4 ドラッグジェスチャによる物体の水平移動システムの実装

(1) 物体の影に対するドラッグジェスチャ判定

ドラッグジェスチャによる物体の水平移動システムでは、影に対してドラッグジェスチャを行うことで、物体の水平方向の移動を可能にする。3.5.3 項でも述べた様に、物体が移動する事で、光源との位置関係が変化し、インタフェースとしての影の操作面積も変化する事が予想されるため、本システムでは物体を宙に浮かせ、物体の上部に光源となる照明機器を配置し、物体の移動に合わせて照明機器も移動させる事で、インタフェースとなる影の大きさと形状を一定に保つ。影へのドラッグ判定は、ピンチジェスチャによる物体の垂直移動システムと同様に、仮装の影領域をプログラム内に設定し、その影領域内部に指の座標が検出された時に水平移動機構を動作させる。

本システムので使用する FTIR タッチパネルは、タッチによる移動停止システムと同様の規格のものを使用する。図 3.23 に水平移動システムの設計図を示す。

(2) 物体の水平移動機構

物体の水平移動は、XY プロッタを用いて影にタッチしている指先が動いた際にその方向へ物体の座標を移動させるように X 軸と Y 軸のモータを制御する。XY プロッターとは、3D プリンターやレーザーカッターなどに使用され、2 軸のステッピングモーターを制御することにより、中心のヘッドを指定した座標まで移動させることができる。本研究では、図 3.24

の MakeBlock 社の XY プロッターを使用し、FTIR でタッチした箇所の座標をプロッターのヘッドの座標へと変換し、物体の移動を行う。XY プロッターはタッチパネルの上部に配置し、プロッターの中心ヘッドから下に物体を吊り下げるように物体を配置する。

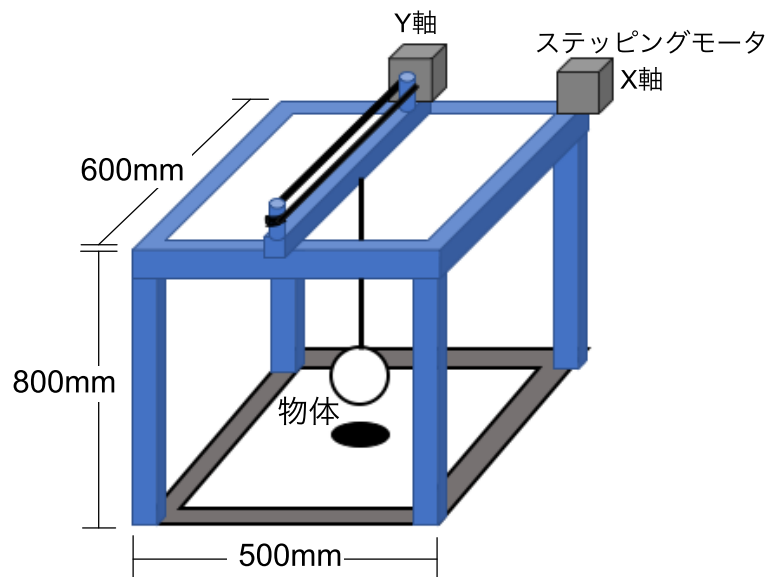


図 3.23: ドラッグジェスチャによる物体の水平移動システムの設計図

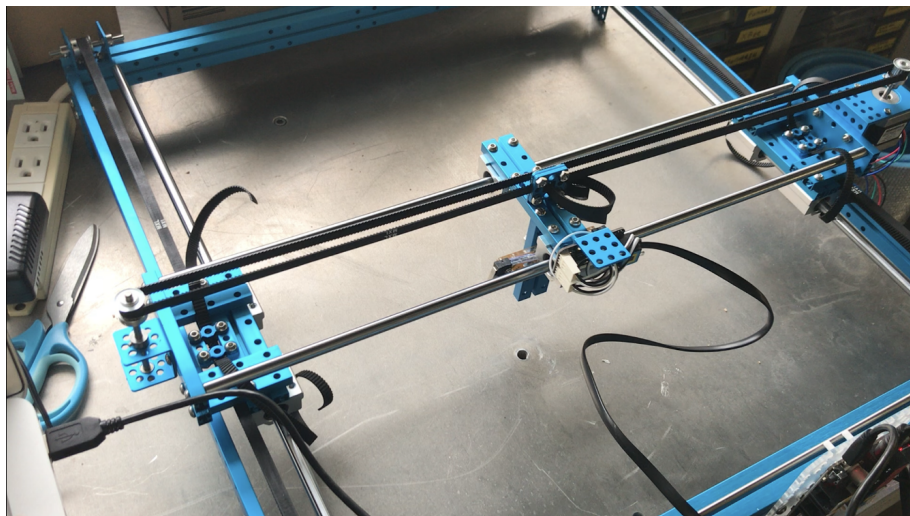


図 3.24: 実際に使用した XY プロッター

3.7 複数ジェスチャによる物体の三次元移動システムの提案と実装

本節では，KUI の基礎システムで提案した影に対するジェスチャを複数組み合わせることで，物体の 3 次元移動を可能にするインタラクション手法を提案し，その実装方法について述べる．操作には，ピンチイン・ピンチアウトジェスチャとドラッグジェスチャを用いることで，物体の 3 次元移動を可能にする．本システムの全体構成は図 3.25 のように FTIR タッチパネル，水平移動機構，垂直移動機構の 3 つによって構成される．FTIR タッチパネルはタッチによる物体の移動停止システムと同じ構成の物を使用する．よって本節では，操作方法とインタラクション手法について説明し，システム設計と実装方法について述べる．

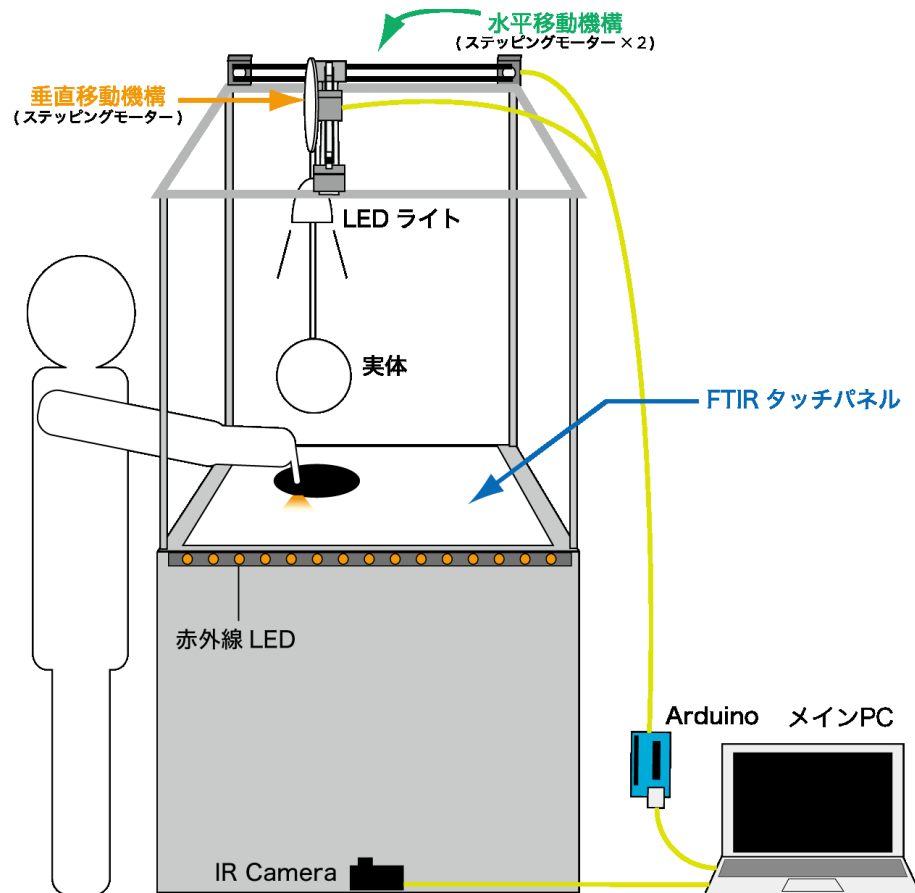


図 3.25: 複数ジェスチャによる物体の三次元移動システムの構成図

3.7.1 物体の 3 次元移動インタラクションにおける操作と影の変化

操作方法として，3.5.1 項で述べたピンチジェスチャによる物体の垂直移動システムと，3.5.3 項で述べたドラッグジェスチャによる物体の水平移動システムの操作方法を組み合わせ

せることで、物体の3次元移動を可能にする。

本システムは、図 3.25 のように、上部機構から物体を吊るし、影が投影される操作面と物体の間に数センチの距離を設ける。また物体の上部に光源を配置し、常に影が物体の真下に投影される様にするすることで、物体が移動しても影の形状や大きさを一定に保ちながら操作する事が可能である。図 3.26 のように、影を移動させる操作にドラッグジェスチャを用いて、影を移動させることで物体を水平方向に移動させるインタラクションとする。また、図 3.27 のように、影を拡大縮小させる操作にピンチイン・ピンチアウトジェスチャを用いて、物体を垂直方向に移動させるインタラクションとする。ピンチイン、ピンチアウトジェスチャは、スマートフォンの操作ではカメラのズームイン、ズームアウトや画像の拡大や縮小の操作に用いられることから、影を拡大縮小させる操作に用いる。提案システムでは、光源を物体上部に設置し、物体を上昇させ光源に接近させることで実影の拡大を可能にする。この影に対する2つのジェスチャ操作を用いることで、物体の3次元移動インタラクションを可能にする。

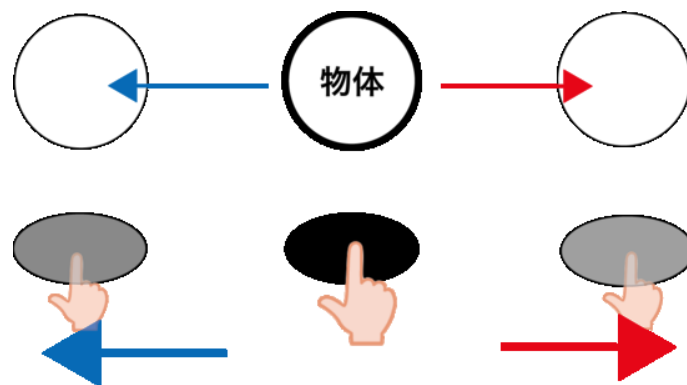


図 3.26: 物体の水平方向移動に用いるドラッグジェスチャ

3.7.2 システム設計

物体の水平移動機構では、影に対してドラッグジェスチャを行うことによって、物体の水平方向の移動を可能にする。物体の水平移動には3.6.4項でも使用した、XYプロッターを用いて影にタッチしている指先が動いた時に、その方向へ物体の座標を移動させる様にX軸とY軸のモータを制御する。

物体の垂直移動機構では、影に対してピンチインピンチアウト操作を行うことにより、影を拡大縮小させ、物体の上下移動を可能にする。物体の垂直移動は、3.5.1項で使用した巻き取り式の滑車にナイロンワイヤーで物体を吊り下げる方式では、水平方向に移動する際の

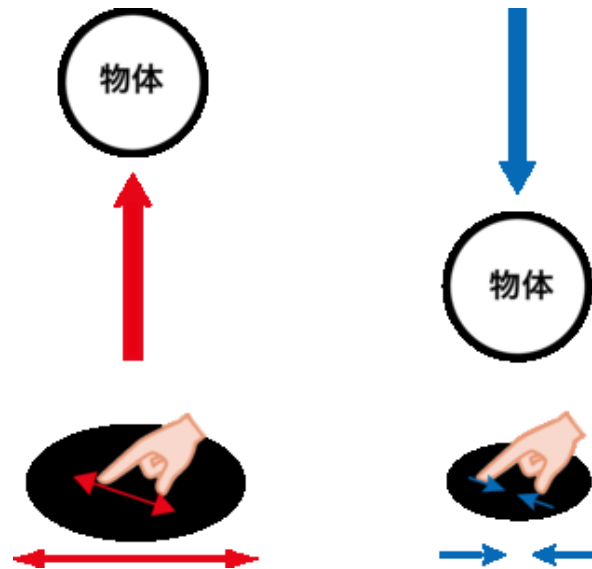


図 3.27: 物体の垂直方向移動に用いるピンチイン・ピンチアウトジェスチャ

影響で大きく揺れてしまう．そのため，物体にアクリル性の棒を取り付け，モータにて引き上げることで上昇させ，引き下げることで下降を行う．この動作を実現するために二つの設計を検討する．一つ目の設計では，ステッピングモータにギアを取り付け，図 3.28 のように，もう一つのギアを噛み合わせることでモータの回転方向に 2 つのギアが回る仕組みを利用し，図 3.29 のようにギアの上に押し出しのジョイントを取り付けることで，棒の押し出しを予定していた．しかしこの設計では，棒とジョイントの間隔の調節が難しく，摩擦によりステッピングモータが脱調することが実験時にあった．二つ目の設計は，図 3.30 のように，ステッピングモータに巻き取り機を取り付け，モータの回転によって，糸を巻き取ることにより糸の先端に取り付けた物体の棒を引き上げることで物体の上下移動を行う．本システムでは，一つ目の設計で発生した問題を解決出来る事から二つ目の設計を採用する．

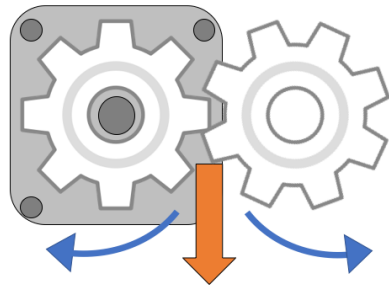


図 3.28: 垂直移動機構の初期設計図

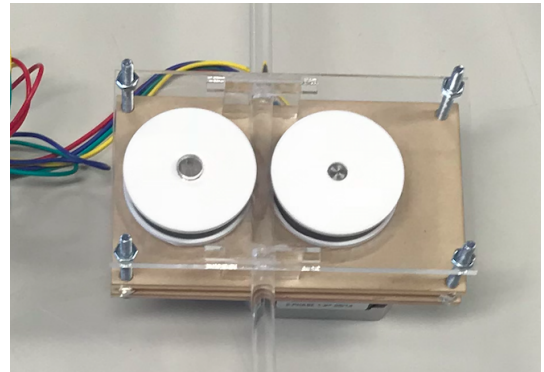


図 3.29: 実験用に制作した初期設時の
垂直移動機構

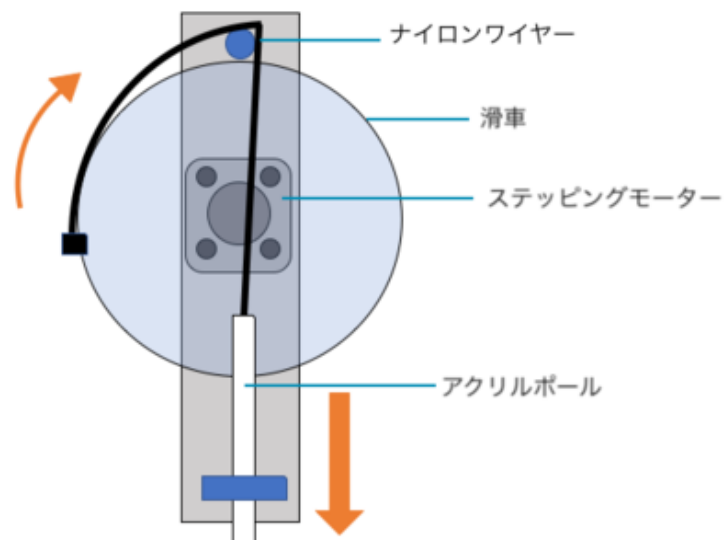


図 3.30: 物体の垂直移動機構に採用する引き上げ機構

3.7.3 システムの実装

物体の垂直移動システムには、巻き取り式の滑車と滑車を回転させるステッピングモータを用いて実装する。物体には移動時の揺れ防止のため透明の亚克力ポールを取り付け、ポール先端に取り付けたナイロンワイヤーを滑車で巻き取ることで、垂直方向の移動を行う。滑車は、スチレン素材を用いて制作し軽量化することで、ステッピングモータへの負荷を軽減する。ステッピングモータを支える土台などは、プロッターの上に取り付けるため、強度と軽量化を考慮し亚克力素材を用いて制作する。実際に制作した垂直移動機構を図 3.31 に示す。ステッピングモータは水平移動機構と同じく Arduino Uno マイコンボードにて制御を行い、FTIR タッチパネルでピンチイン、ピンチアウトジェスチャが検出された際にステッピングモータを制御し滑車を回転させる。影へのピンチイン、ピンチアウトジェスチャの判定は、まず仮想影の領域内でパネルにタッチしている指が 2 点あるかを判定し、2 点間の距離を計測する。2 点間の距離が増加した場合ピンチアウトジェスチャと判定し、減少した場合をピンチインジェスチャと判定する。そして、2 点間の距離の変化量に応じてステッピングモータを制御し物体の上昇、下降を行う。物体が上昇するにつれ、仮想影の判定領域も中心から均等に大きくなるように設定し、高さの最高位置に達した場合には、物体の上昇と仮想影の増加も停止させる。これにより物体の上昇に合わせ仮想影の判定領域も大きくなり、ユーザーには実影を操作しているような体験を与えることが出来る。

実際に制作した複数ジェスチャによる物体の三次元移動システムを図 3.32 に示す。実装した水平移動機構のヘッド中央に垂直移動機構及び光源となる LED ライトを取り付け、図 3.32 右のように LED ライトを点灯させることで影を生成する。物体を支える亚克力ポールは LED ライトのディフューザー中央を通るように設計している。FTIR タッチパネルの赤外線カメラや移動機構を制御する Arduino Uno マイコンボードはメイン PC に接続し、openFrameworks(C++) を用いたメインプログラムによって制御する。水平移動機構のサイズは横 500mm、縦 400mm であるが、リミットスイッチを配置しているため、実際に物体が移動可能な距離は、横 360mm、縦 320mm である。物体の高さの最低位置はパネルから 200mm の高さに設置し、最高位置は 400mm の高さに設置している。上昇した際に物体が設定した標準ユーザーの目線より下に来るように実装したことで、影と物体を同時に視認可能となる。水平移動機構の操作分解能は縦横 255 分割であり、垂直移動機構は 180 分割となっている。図 3.33 に示すように、ドラッグジェスチャにより物体を水平方向に操作することが可能であり、図 3.34 に示す様に、ピンチジェスチャによって物体の垂直方向への移動が可能になる。この二つのジェスチャを組み合わせることで、図 3.35 のように影への操作による物体の 3 次元移動が可能になる。

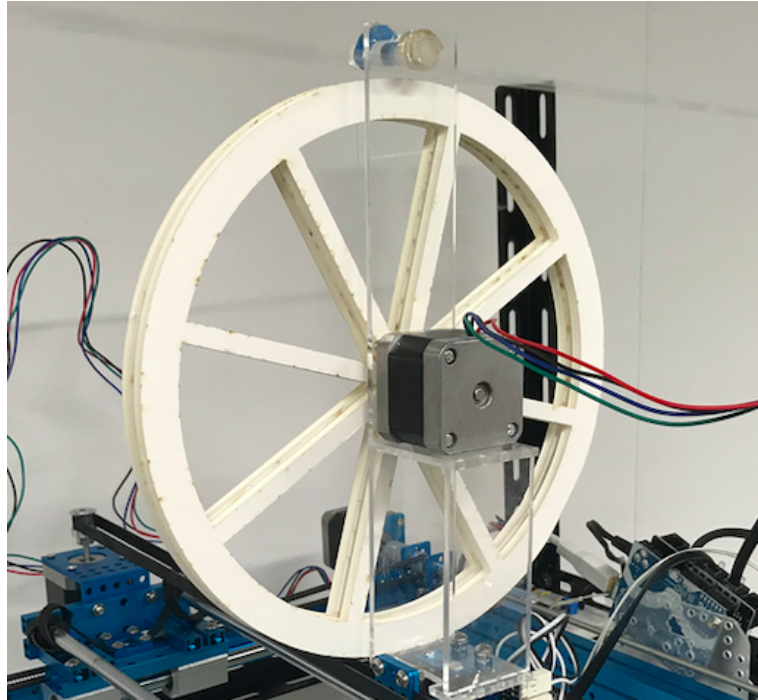


図 3.31: 制作した垂直移動機構

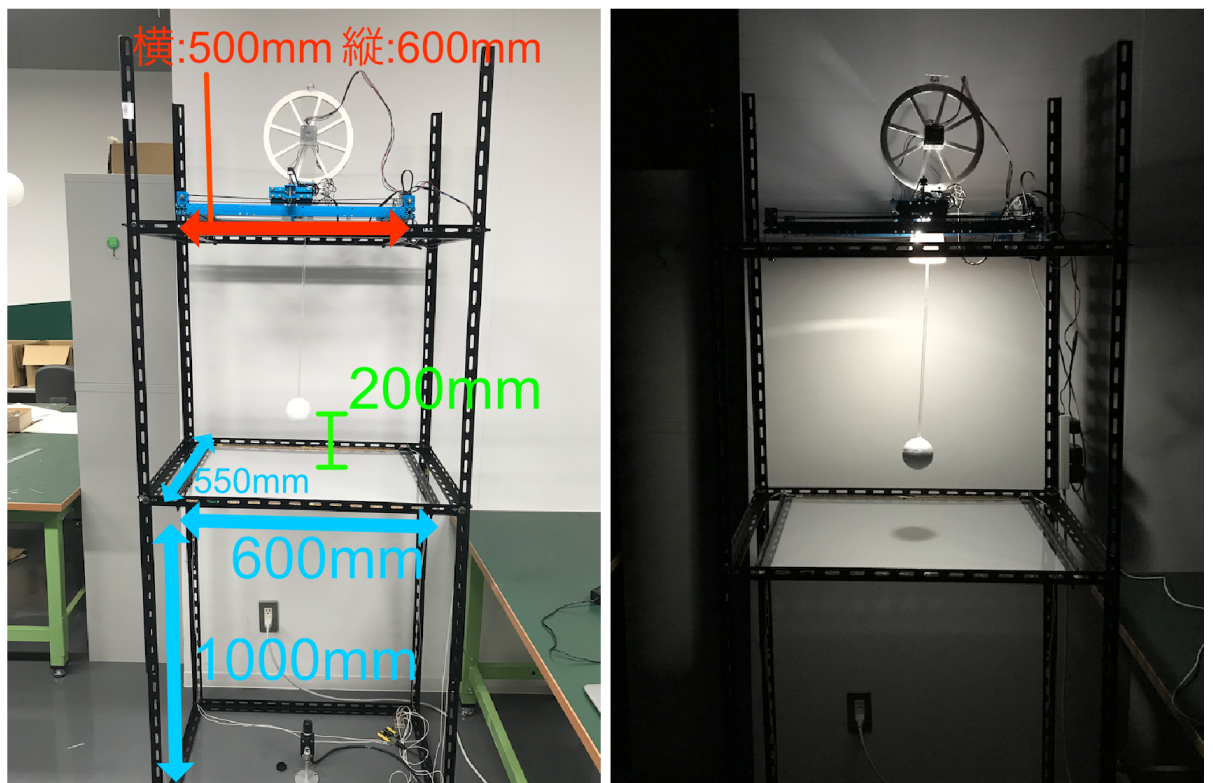


図 3.32: 制作した複数ジェスチャによる物体の三次元移動システム

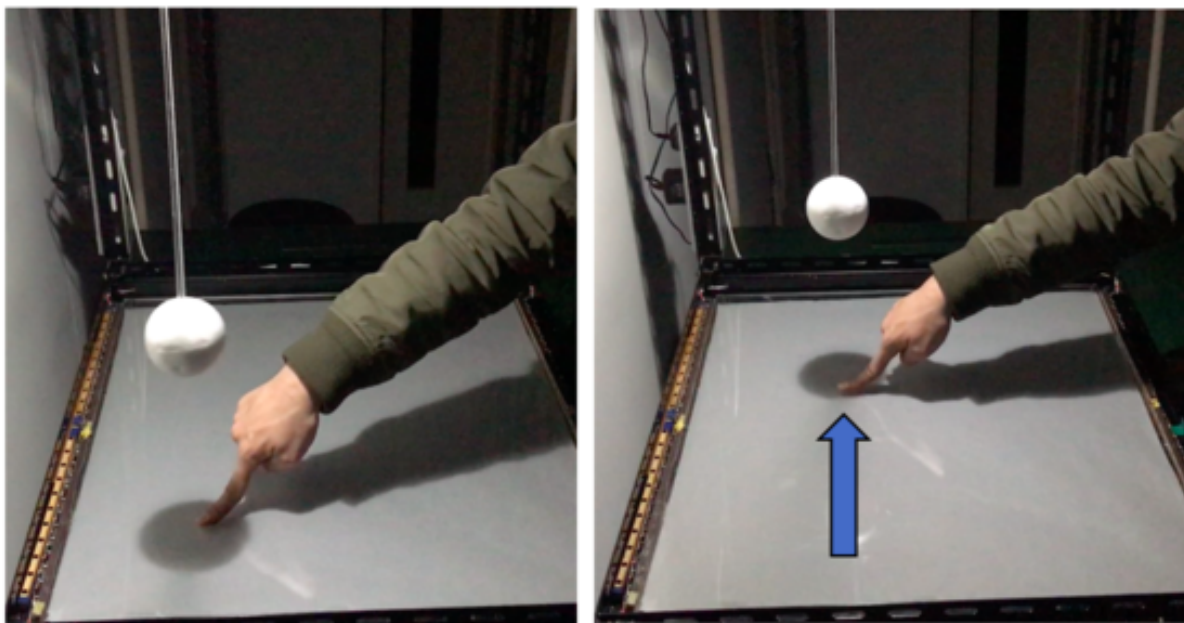


図 3.33: ドラッグジェスチャによる物体の水平移動の様子

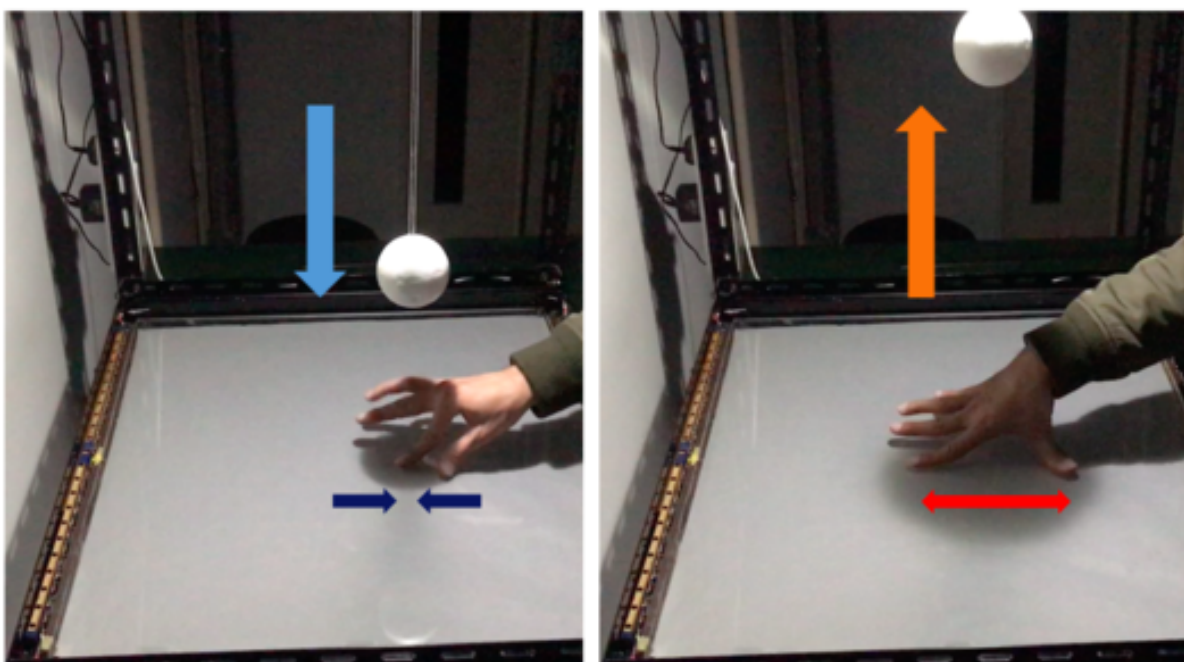


図 3.34: ピンチジェスチャによる物体の垂直移動の様子

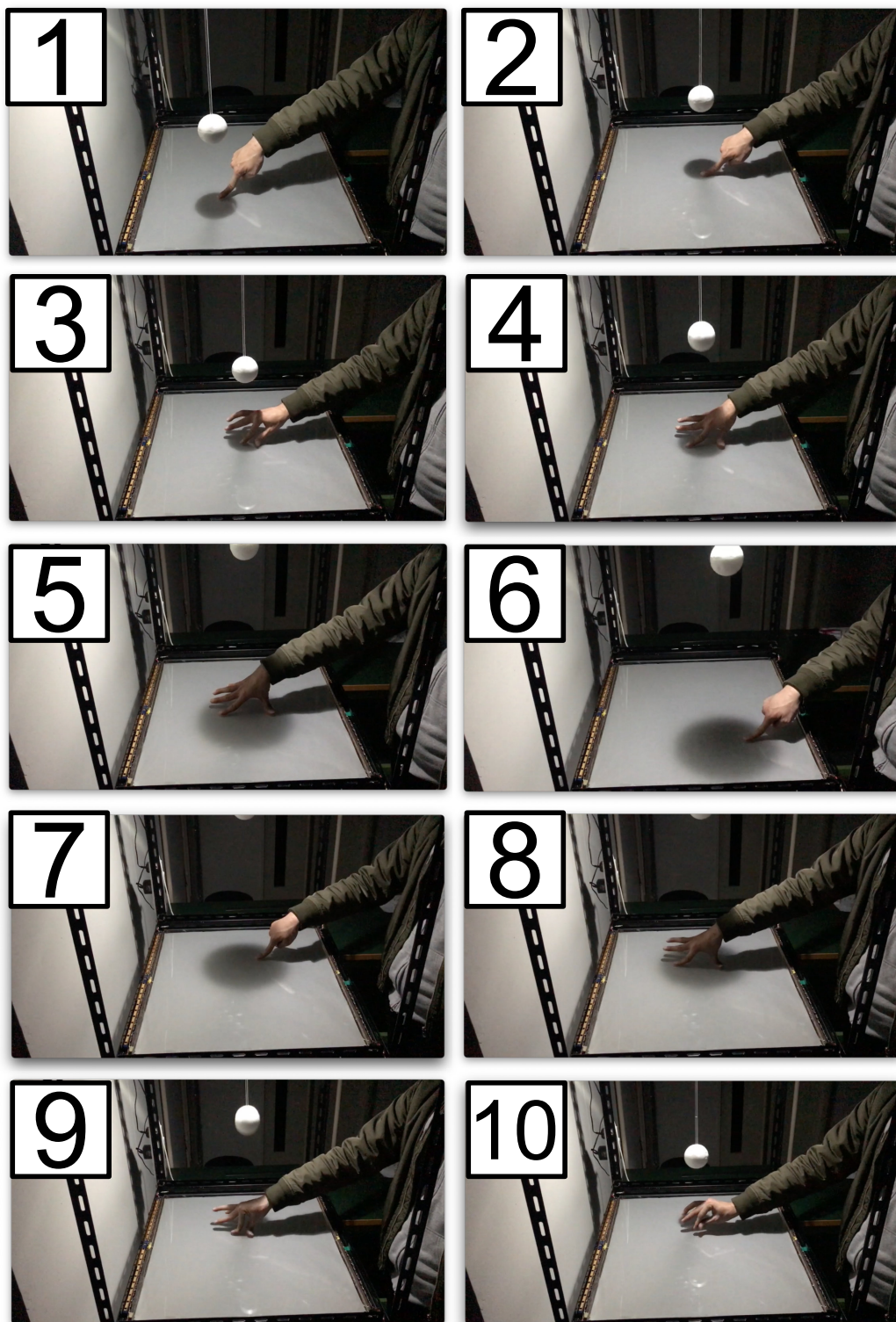


図 3.35: 物体の 3 次元移動における一連の操作の様子

第4章 影を用いた実世界指向インタフェース における基礎システムの評価

3章で提案した、影を用いた実世界指向インタフェースにおける KUI の基礎システムと 3.7 節で述べた、複数ジェスチャによる物体の三次元移動システムに対して評価実験を行う。KUI のインタフェース概念には、影の文化的背景から「影から物体へ影響を与える」という実世界の影と物体の関係性を逆説的に捉えた概念を用いている。そのためユーザがこのインタフェース概念を理解し影を介して物体とインタラクションを行なうことができるか評価する必要がある。評価実験では、KUI のインタフェース概念の理解や、影を操作し物体とインタラクションを行なう際の操作性、影を操作するという体験の新規性などを評価するため、被験者にシステムを体験してもらいアンケート調査によって評価を行なう。また、本来操作する事のできない影を操作するという感覚をユーザに与えるためには、インタフェース概念の理解に加え、インタフェースのシステム精度も評価する必要がある。そこで、システムの操作時の追従性などを測るため、システム精度と、操作分解能について評価実験を行なう。

本章では、4.1 節にて、ユーザ評価実験によるインタフェースの操作性評価について、評価項目、アンケート内容、評価結果を示し、評価結果に対する考察を行なう。また、4.2 節にて、動作実験によるシステムの精度評価について、4.1 節と同様に、評価項目、評価内容、評価結果を示し、評価結果に対する考察を行なう。最後に、二つの評価実験で得られた結果から、3章で提案した KUI における基礎的システムの有効性について述べる。インタフェースの操作性に対する評価実験では、KUI のインタフェース概念の理解や影を操作する体験の新規性について評価を行なうため、影と物体の関係性が特に強調されたインタラクション手法である「ピンチジェスチャによる物体の垂直移動システム」と「タッチジェスチャによる移動停止システム」を対象に評価実験を実施する。そして、動作実験によるシステムの精度評価では、システムの追従性について精度評価を行なうため、同一システムで複数操作が可能な「複数ジェスチャによる物体の三次元移動システム」を対象に、水平方向と垂直方向に対して精度評価を行なう。物体の三次元移動システムは、複数機構を統合し実装されていることから、応用性が高く、本稿以降の応用手法にも組み込まれることから、精度評価を行なう。

4.1 ユーザ評価によるインタフェースの操作性評価実験

本節では、提案する KUI の基礎システムにおいて、インタフェース概念の理解や、インタラクション時の操作性、影を操作する体験の新規性について評価するため、アンケート調査によるユーザ評価を行なう。評価方法は、実際に被験者となるユーザにシステムを体験してもらい、体験後に評価項目に対するアンケート調査を実施する。本評価実験では、ピンチジェスチャによる物体の垂直移動システムとタッチジェスチャによる移動停止システムを対象に評価実験を行なう。

4.1.1 評価項目

影を操作する体験の新規性、インタフェース概念の理解、インタフェースの操作性、の3項目を評価するため、2017年1月27日から31日の期間に、明星大学28号館118教室にて本大学の学生を対象として20人に評価実験を行った。影を操作するため暗い部屋での実験がユーザーにより良い効果を与えられると考え、図4.1のような環境で実験を行った。評価実験の手順として、最初に本研究についての概要を説明し、物体の垂直移動システムの操作方法を説明する。その際、物体がどの様に変化するかは説明せずに、垂直移動システムを実際に体験してもらう。次に、移動停止システムの操作方法を説明し、実際にシステムを体験してもらい、最後に、4.1.2節に示すアンケート調査を実施した。Q1の回答は2択で、Q2とQ12は自由記述である。その他は全て4段階リッカート尺度を用い評価を行った。



図 4.1: 評価実験環境

4.1.2 アンケート調査内容

- ・ 影を操作する体験の新規性について

Q1 この作品以外で、今まで影を操作した事がありますか

(1. はい, 2. いいえ)

Q2 1で「はい」と回答した人はどこで操作したかをご記入下さい

(自由記述：)

Q3 影を操作することで起こる物体への影響、物体の行動に予想がつかしましたか

(1. 予想出来なかった, 2. あまり予想出来なかった, 3. 大体予想出来た, 4. 予想出来た)

Q4 影を操作する感覚を得る事が出来ましたか

(1. 出来なかった, 2. あまり出来なかった, 3. 少し得る事が出来た, 4. 得る事が出来た)

Q5 影を操作する感覚は新鮮でしたか

(1. 新鮮でなかった, 2. あまり新鮮でなかった, 3. 少し新鮮だった, 4. 新鮮だった)

- ・ インタフェース概念の理解について

Q6 この作品には、物と影に相互的関係があると思いませんか

(1. 思わなかった, 2. あまり思わなかった, 3. 少し思った, 4. 思った)

Q7 作品を通して、影から物体に影響を与えるという概念を理解出来ましたか

(1. 理解出来なかった, 2. あまり理解出来なかった, 3. 少し理解出来た, 4. 理解出来た)

- ・ インタフェースの操作性について

Q8 操作方法は解りやすかったですか

(1. 解りづらかった, 2. 少し解りづらかった, 3. 少し解りやすかった, 4. 解りやすかった)

Q9 思い通りに操作を行う事が出来ましたか

(1. 出来なかった, 2. あまり出来なかった, 3. 少し出来た, 4. 出来た)

Q10 操作に対する物体の反応速度は良いと思いませんか

(1. 思わなかった, 2. あまり思わなかった, 3. 少し良いと思った, 4. 良いと思った)

Q11 操作と物体の動作は合っていると思いませんか

(1. 思わなかった, 2. あまり思わなかった, 3. 少し思った, 4. 合っていると思った)

- ・ 自由記述

Q12 自由記述 (思ったこと、感じたこと、感想などあればご記入下さい)

(自由記述：)

4.1.3 評価結果からの考察

Q1 及び、Q3 から Q11 までの実験の結果を、評価ごとの人数の割合でグラフにて表す。図 4.2 は Q1 の回答結果のグラフであり、図 4.3 は Q3 から Q5、図 4.4 は Q6 から Q7、図 4.5 は Q8 から Q11 の回答結果のグラフである。評価 4 が最も良い評価となり、低評価の 1, 2 を寒色、高評価の 3, 4 を暖色で表している。

評価実験で得られた結果から、新規性はあったか、概念は理解出来たか、操作性は良かったかの3項目に分け、考察を行う。

(1) 新規性についての実験結果の考察

新規性についての質問はQ1からQ5である。図4.2から、影を操作する体験(影を操作する意識)をしたことのある被験者は少ないことがわかる。Q2の回答では、影絵やチームラボの展示にて影を操作する作品に触れたと回答している。図4.3のQ3のグラフから低評価である評価1、評価2を選択した被験者の割合が、70%であることから、物体の行動に予想がつかなかった回答者が多い事が確認できる。これは、影を操作する意識をしたことの無い被験者が多い事から、操作による物体の動作に予想がつかなかったと考えられる。Q4、Q5のグラフでは高評価である評価3、評価4を選択した被験者の割合がいずれも80%以上であり、影を操作したことの無い被験者が多い中、影を操作するという初めての感覚を半数以上の被験者に与える事ができたと言える。以上の結果から、本作品を体験した被験者の多くに影を操作するという新しい感覚を得る事が出来たと考える。しかし、今まで影を操作するという意識をする機会がなかったため、影の操作による物体の行動に予測がつかなかったと考えられる。

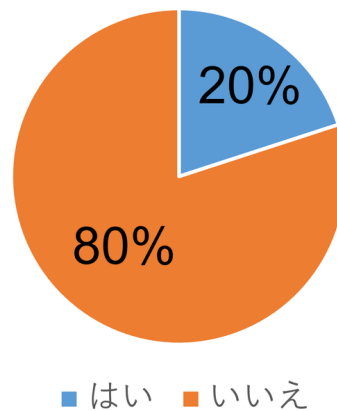
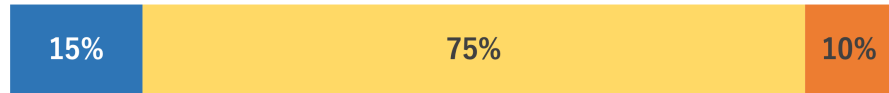


図 4.2: Q1 の回答結果

Q3 影を操作することで起こる物体への影響，物体の行動に予想がつきましたか



Q4 影を操作する感覚を得る事が出来ましたか



Q5 影を操作する感覚は新鮮でしたか

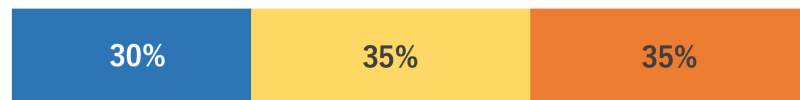


図 4.3: 新規性についての実験結果

(2) 概念の理解についての実験結果の考察

概念の理解についての質問 Q6, Q7 の実験結果を図 4.4 に示す. Q6「物体と影に相互的関係があると思ったか」では 70 % の高評価を得る事ができたが, 30 % の被験者は低評価を付けている. また, Q7 では高評価の回答結果が 100 % である事から, 被験者全員が KUI のインタフェース概念を理解する事ができたと言える.

Q6 この作品には, 物と影に相互的関係があると思いましたか



Q7 作品を通して, 影から物体に影響を与えるという概念を理解出来ましたか



図 4.4: 概念の理解についての実験結果

(3) 操作性についての実験結果の考察

操作性についての質問 Q8 から Q11 の実験結果を図 4.5 に示す. Q8「操作方法は解りやすかったか」は 100 % の回答で高評価を得る事ができた. しかし, Q9 では低評価の回答が

55 %である事から、半数の被験者が思い通りに操作を行なうことが出来なかった事がわかる。また、Q10でも半数以上の回答が低評価である事から、操作に対するシステムの反応速度や動作速度が操作性に影響している事がわかる。Q11では、90 %の回答が高評価であることから、操作方法と物体の動作、つまりインタラクションの手法については、理解を得られた結果となった。

以上の考察から、KUIで提案する影への操作方法は、影への操作を意識したことの無い被験者でも、理解しやすく、インタラクションにおける操作と物体の動作の整合性も取れていると言える。しかし、被験者の多くは、今まで影を操作する意識をしたことが無いため、思い通りに操作する事が出来なかった、または、反応速度や動作速度等の問題で思い通りに操作を行うことが出来なかったと考えられる。しかし、実際に物体が動作する事によって、操作と動作の関係性は理解を得る事が出来たと考えられる。

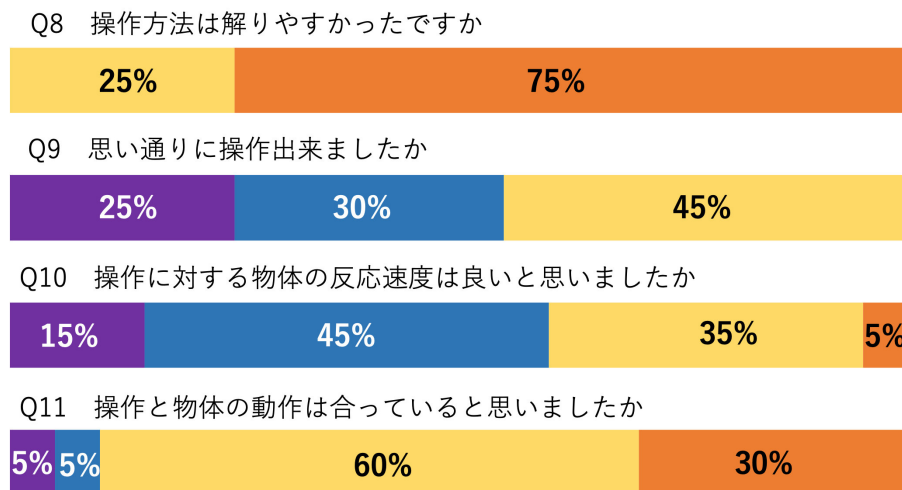


図 4.5: 操作性についての実験結果

4.2 動作実験によるシステムの精度評価

本節では、提案する KUI の基礎システムにおいて、動作精度や操作に対する追従性を評価するため、同一システムで複数操作が可能な「複数ジェスチャによる物体の三次元移動システム」を対象に、水平方向と垂直方向に対して動作実験を行なう。

4.2.1 評価項目

影に対する操作を画像処理により認識し、物体の移動を制御することで、現実では起こりえない影を操作し物体に影響を与えるインタラクションを可能にする。そのため、物体の移動速度やユーザーの操作を認識する処理速度により、提案手法の操作感が決まる。本節では、提案手法の時間的精度を求めるために、物体が操作に対し追従する最高速度を計測し、操作の速度評価を行う。実験方法は、まず物体の移動可能速度の上限値を求めるため、使用するモーターの上限速度(モーター速度)を計測する。次に、ジェスチャー操作によって物体を移動させた時の操作時間(指を影に当て、ドラッグし目標座標で指を操作面から離すまでの時間)を画像処理によって計測し、操作速度を計算する。そして、操作時間に対し、物体が移動を開始し目標座標に到達するまでの時間から物体速度を算出し、モーター制御に使用する Arduino で計測する。物体の移動方向は、操作面に対しての縦、横、斜め方向と垂直方向に対して計測する。(物体の移動距離は 3.7.3 項で示した距離とする)

4.2.2 評価内容

物体の三次元移動システムには、水平移動機構と垂直移動機構でシステムが構成されているため、影への操作で水平方向に物体を移動させた際の動作速度と、垂直方向へ物体を移動させた際の動作速度を計測する。図 4.6 に動作実験で評価する物体の移動方向を示す。水平方向の物体移動は図 4.6 に示す様に、①横方向、②縦方向、③斜め方向に対し、速度を計測する。これにより、水平移動機構の各軸のモータ精度と 2 軸のモータを同時に動作させた際の移動速度を計測する事ができる。また、垂直方向への物体移動は図 4.6④ の様に、影へのピンチジェチャにより物体が垂直上方向へ移動した際の速度を計測する。

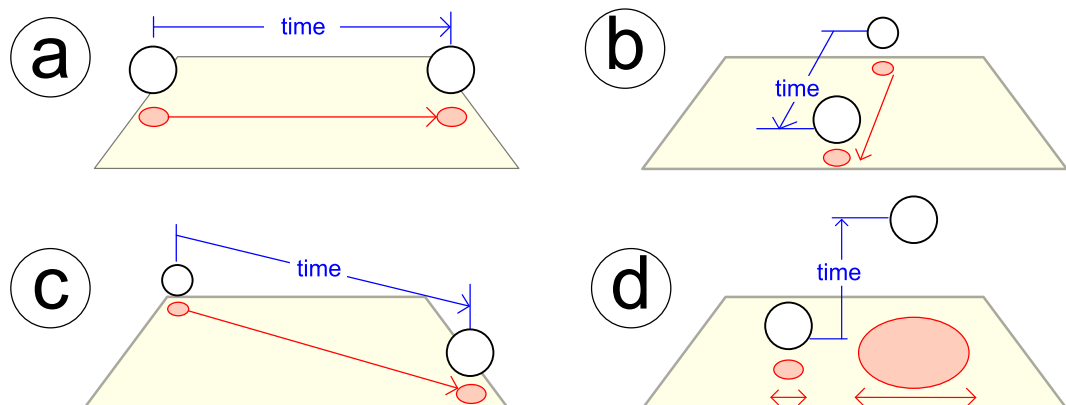


図 4.6: 動作実験に用いる動き

4.2.3 評価結果

表 4.1 に計測結果を示す。

表 4.1: 各モータの動作速度 (mm/s)

	モーター速度	操作速度 A	物体速度 A	操作速度 B	物体速度 B
a: 横	170.87	95.69	86.43	240.32	130.29
b: 縦	206.08	89.48	104.33	283.43	142.53
c: 斜め	130.01	104.23	111.36	164.2	132.46
d: 垂直方向	296.29	61.5	64.16	250.62	142.85

4.2.4 評価からの考察

表 4.1 に示す操作速度 A と物体速度 A は、指をゆっくり動かし、操作速度 B と物体速度 B は、指を早く動かした際の評価結果である。物体速度が操作速度を上回る状態は、影を後ろから押すように操作した時に発生する状態であり、物体が先に目標到達点に達した状態を表す。操作速度 B のように指を早く動かした状態では、物体の移動速度では追いつけず、物体速度 B はモーター速度にとどかない結果となった。この状況が発生した要因としては、画像処理、座標計算、Arduino との通信など、モーター制御以外の処理で時間を要したことが考えられる。また、その条件下では、物体速度 B を上回る操作速度で操作すると、物体の移動速度を超過してしまう。つまり、操作に対して物体の追従に遅延が生じることになる。

4.3 二つの評価結果からの考察

4.1 節で示した、ユーザ評価実験によるインタフェースの操作性評価と、4.2 節にて、動作実験によるシステムの精度評価で得られた結果から考察する。インタフェースの操作性評価実験では、被験者によるユーザ評価を行い、新規性、インタフェース概念の理解、操作性について評価を行った。実験の結果から、影への操作は新鮮であり、初めて意識して影を操作する被験者でも影と物体の関係性を理解し、操作を行なう事ができた事がわかった。これは、影への操作方法が普段使い慣れているスマートフォンのジェスチャ操作に準拠している点や、身体的でシンプルなハンドジェスチャを持ちた点、何らかの過去作品から影で物体を操作する概念を知っていた事が操作の理解を促したと考えられる。この事から、KUI における影を

インタフェースに用いる手法及び、その操作方法は、影と物体の関係性をインタフェース概念に取り入れた事から、物体とのインタラクションを行なう上で有効的な操作手法であると言える。しかし、FTIR タッチパネルの認識精度や移動機構の動作精度により、操作を上手くできなかった被験者もいた事から、システムの実装環境の改善が今後の課題になると言える。また、動作実験では、影に対してゆっくり操作を行った際(表 4.1 速度 A)の追従速度の差は 0.1 秒以下であるが、素早く操作を行った際(表 4.1 速度 A)の追従速度の差は 0.1 秒以上になっている。人間は操作に対して 0.1 秒以上の待ち時間が有ると遅延を感じると言われる [54] 事から、影を素早く操作するようなインタラクションには不向きである事がわかる。しかし、これはモータの速度性能や、ジェスチャ検出に用いる画像処理の処理時間によるため、より高速制御可能なモータを選定する事やジェスチャ検出の手法を変更することで改善できると考える。

4.4 本章のまとめ

本章では、4.1 節にて、ユーザ評価実験によるインタフェースの操作性評価について、評価項目、アンケート内容、評価結果を示し、評価結果に対する考察を行った。また、4.2 節にて、動作実験によるシステムの精度評価について、4.1 節と同様に、評価項目、評価内容、評価結果を示し、評価結果に対する考察を行い、最後に二つの評価実験で得られた結果から、3 章で提案した KUI における基礎的システムの有効性について述べた。実験の結果から、KUI のインタフェース概念により、影から物体を操作する感覚をユーザへ与えることが出来たと言える。KUI のインタフェースを応用することで、影を用いたインタラクティブメディアにおいて、物体を操作する有効的なインタフェースになると考える。また、影を用いたメディアアートやインタラクティブアートにおいても、有効的な操作手法となり、新しい影の表現手法を提案する事が可能であると考ええる。

第5章 KUIの発展とメディアとしての影の拡張

本章では、本研究で提案する影を用いた実世界指向インタフェースである KUI を発展させた応用手法として、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「Augmented Shadow Media」を提案する。本研究において、影のメディア的性質とは、影絵などの影の形状や動きの変化によって、影のアニメーションに内包するコンテンツを伝達する視覚メディアとしての性質を指す。著者は、このような影のメディア的性質に着目し、3章で提案した影ユーザーインタフェース (KUI) を発展させた Augmented Shadow Media によって、実影の位置・形状の編集と保存、実影により保存されたアニメーションの再生を可能にする。Augmented Shadow Media では、実影をインタフェースとして複数のジェスチャー操作を組み合わせることで、物体の3次元移動を可能にし、影の上下左右の移動とスケールの変化によって、実影によるアニメーションの作成を行う。また、影に対する操作により変化した物体の動きを保存することにより、影のアニメーションを保存し再生することが可能となる。本研究により、KUI を発展させ実影を視覚情報メディアとして拡張することで、影を録画された映像ではなく実影で編集・保存・再生が可能となる。それにより、今後ワヤン・クリなどの伝統的な影絵のデジタルアーカイビング分野への活用が期待される。

5.1 影のメディア的性質について

古くから影はメディアとして使われてきた。手の影で形を作る手影絵や、人形を操りその影で芝居をする人形影絵などがあり、光源と光を遮る遮蔽物があれば簡単に影を作り出すことができる。そして、それら影絵は2次元的情報ではあるが、操作により動きが加わることで伝統や言い伝えなどストーリーのある情報を伝えるメディアとして用いられて来た。伝統的な影絵芝居の例として、インドネシアの「ワヤン・クリ (Wayang Kulit)」、タイの「ナン・ヤイ (Nang Yai)」[55]、カンボジアの「スパエク・トム (Sbaek Thom)」[56] などがある。ワヤン・クリはインドネシアの伝統的な人形影絵芝居であり、ユネスコの無形文化財にも指定されている。現代でも多くの影絵劇団 [57][58] が存在し、影絵は人気のコンテンツとして用いられている。

映像技術が発展した現代でも、影絵や影のアニメーション表現を取り入れるアーティストは多い。早乙女太一とチームラボが手掛けた「龍と牡丹－剣舞／影絵－」[59]は舞台劇とCGの影による映像演出を合わせた作品である。舞台上の役者による立ち回りとCGの影による演出が一致する事で、実際に敵の影と対峙しているような表現を行っている。実影を使ったメディアアートでは、クワクボリョウタの「10番目の感傷(点・線・面)」[60]が有名である。この作品では、CGを使わずに様々な物体と移動するライトだけで影を作り出し、物体の影がまるで動画のように見える作品である。このように影絵や「10番目の感傷」では、影の形状や大きさを変化させることで、アニメーションの一種として内包するコンテンツを伝える機能(以降、メディア的性質とする)を持っている。これら伝統的な影芝居や影のアニメーションは、アニメーションに内包される伝承、ストーリーや文化などの情報を観客に伝達するためのメディアであると言える。

伝統的な影芝居にはワヤン・クリのように無形文化財に指定される貴重なものもあり、後世への継承やデジタルアーカイビングによる保存活動が進められている。影絵のアニメーションを映像データとしてデジタルアーカイビングすることによって、文化財をデータとして保管すると共に、これまで口頭や実際の稽古によって継承されてきた影絵の表現方法も保存された映像データを視聴して習得する事も可能になると考える。しかし、これらメディア的性質を持つ影絵の従来の保存方法に着目すると、カメラで録画された映像として記録保存されるのが主である。従来の保存方法では、撮影するカメラの性能や、撮影環境、視聴するディスプレイの解像度によって影本来の情報が変更され伝達されてしまうと考える。

5.2 Augmented Shadow Mediaについて

前節で述べたように、影はメディアとしての性質を持ち過去から現代まで視覚メディアとして用いられて来たが、従来の保存方法では、本来の影の情報が変更されてしまうと考えられる。また、従来の保存方法は単一視点からの視覚情報のみ保存可能である。そこで著者は、影絵のメディア的性質を拡張するためのインタラクティブシステム「Augmented Shadow Media」を提案する。

Augmented Shadow Mediaでは、KUIのインタフェース概念を用いて、影絵自体に操作を加えるための直感的に影絵の操作を可能にするインタフェースを提供し、操作によって変更された影絵の動きを保存し再生を可能にする。言い換えると、影絵を操作する事で物体の位置を変更し、その物体の動作を保存し再生する事で、操作時と同じ影絵のアニメーションを保存再生が可能になる。これにより、影絵などのメディアとしての性質を持つ影の従来の保存方法では変更、欠落してしまっていた情報を、本来の情報のまま保存し、再生、編集を

可能になると考える。

Augmented Shadow Media では、これまでの KUI で提供してきた影を操作するインタフェースを発展させ、影絵のアニメーション生成が可能なように、複数の操作を組み合わせた操作方法を可能にする。操作方法として、影を移動させる操作にドラッグジェスチャを影絵特有な拡大縮小の操作にピンチイン・ピンチアウトジェスチャを用いる。本システムを用いる事で、ワヤン・クリなどの伝統的な影絵芝居の保存、伝承に応用することが出来ると考える。また従来の影絵の操作とは異なり、影絵を直接操作することで、新しい操作感を提供することも可能である。Augmented Shadow Media のシステム構成は、3.7 節で述べた複数ジェスチャによる物体の三次元移動システムを応用して実装する。

5.2.1 操作方法とインタラクションにおける物体と影の変化

具体的な操作方法として、KUI の操作は同じ 2 次元平面に対する操作としてスマートフォンのジェスチャ操作に準拠していることから、物体の水平方向移動にドラッグジェスチャを用い、垂直方向移動にはピンチイン、ピンチアウトジェスチャを用いる。提案システムでは、影を移動させる操作にドラッグジェスチャを用いて、影を移動させることで物体を水平方向に移動させるインタラクションとする。また、影を拡大縮小させる操作にピンチイン・ピンチアウトジェスチャを用いて、物体を垂直方向に移動させるインタラクションとする。ピンチイン、ピンチアウトジェスチャは、スマートフォンの操作ではカメラのズームイン、ズームアウトや画像の拡大や縮小の操作に用いられることから、影を拡大縮小させる操作に用いる。提案システムでは、光源を物体上部に設置し、物体を上昇させ光源に接近させることで実影の拡大を可能にする。この影に対する 2 つのジェスチャ操作を用いることで、物体の 3 次元移動インタラクションを可能にする。

5.2.2 影の保存と再生

影の保存には、影を操作した際の物体の動きを保存する。つまりは、物体を動かすためのステッピングモータの制御値を保存することにより、動きの保存を可能にする。図 5.1 に保存と再生の処理手順を示す。本システムでは、FTIR タッチパネルからキャプチャ画像を取得し、メイン PC にて画像処理を行い、タッチ検出、ジェスチャ検出の結果からステッピングモータの制御値を計算する。操作時にその制御値を Arduino へ送信すると共に、メイン PC 内に保存することにより、物体の動きを保存することが出来る。ユーザーの指が影に触れている時を操作中と設定し、その間の送信する制御値を JSON 形式で記録する。指がパ

ネルから一定時間離れたことが検出されると、記録したデータを JSON ファイルとして保存する．これにより物体の動きの保存，言い換えると影の保存が可能となる．

そして、保存が完了すると次に影の再生を行う．保存が完了すると、操作開始時の位置に自動で戻るように設定している．影の再生には、保存された JSON 形式の制御値を読み込み、ステッピングモータを制御する Arduino に読み込んだデータを送信する．保存された制御値からステッピングモータを制御することで、操作時と同じ物体の動きを再現することが可能となる．光源は物体の真上に取り付けられ、物体と共に移動するため、物体と光源の位置関係は変化しないことから、生成される影も操作時と同じ影を作り出すことが可能になる．これにより、操作時と同じ影の動きを保存し、再生することが可能となる．

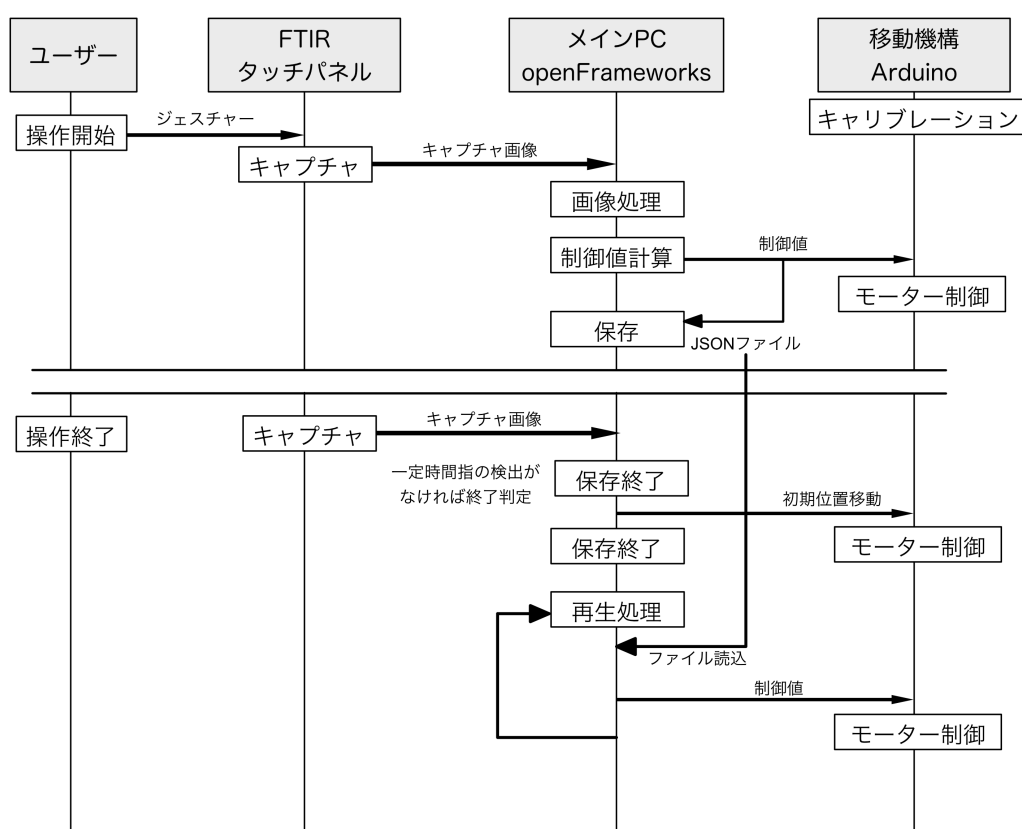


図 5.1: 保存処理と再生処理のシーケンス図

5.3 動作実験

Augmented Shadow Media の動作実験と、実際に生成した影の保存及び再生について実験を行なった．提案システムでは、赤外線カメラを用いることや影の陰影を鮮明にさせるた

め、実験を行う室内では太陽光を遮断、かつ暗くし光源となる LED ライトだけを点灯させて実験を行う

5.3.1 動作の様子

図 5.2 は、物体の一連の動作を 1 から 6 の順で操作時と再生時を比較した図である。図 5.2 左側に操作時の様子を示し、図 5.2 右側に再生時の様子を示す。操作時と再生時の位置を比較することで、入力に対する再生の空間的再現性を評価する。図 5.2 の 1 と 2 では、操作開始から中央に物体を移動させる様子を示しているが、操作時と再生時の様子を比較しても物体と影の位置に変化は見られない。同様に他の比較図でも操作時と再生時の物体と影の位置に違いは見られない。以上のことから、影絵の動作を編集・保存・再生するという目的における空間的再現性は、高いといえる。

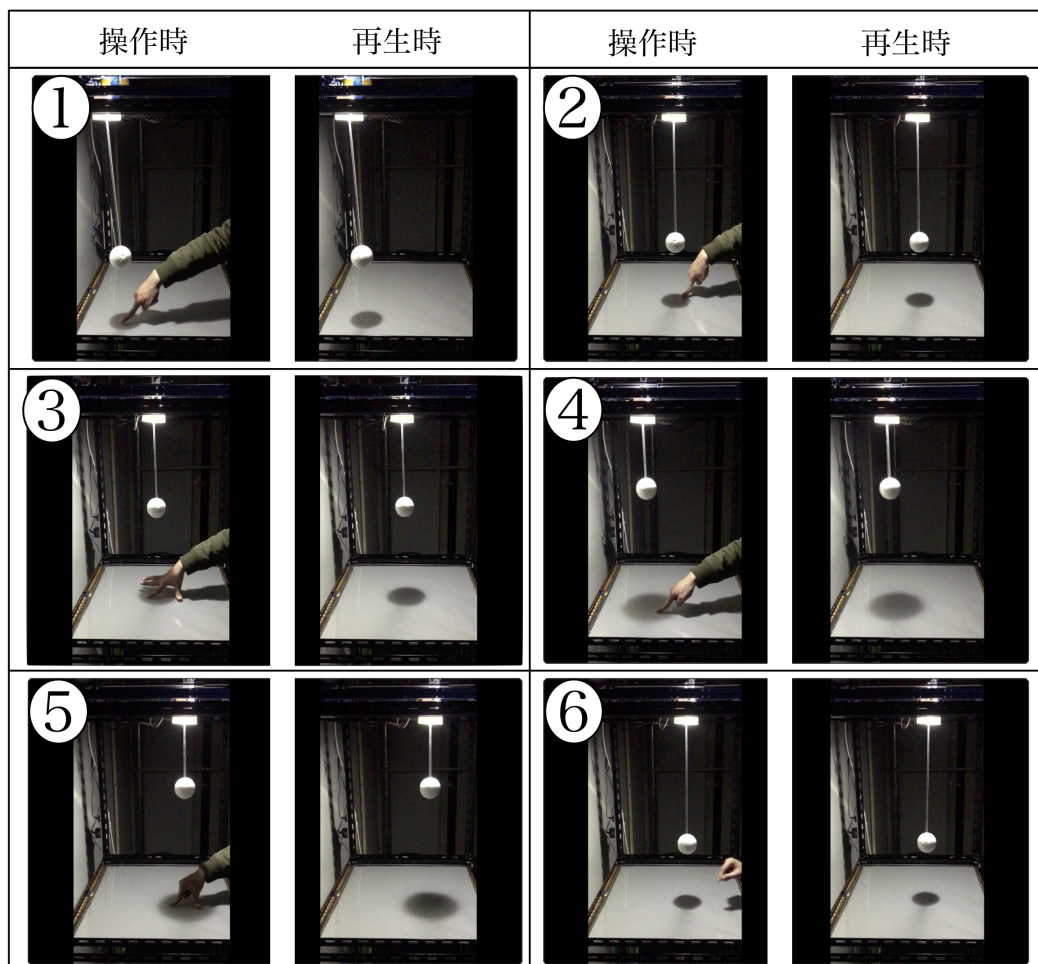


図 5.2: 操作時と再生時の空間的比較

5.3.2 アニメーションの時間的精度に関する評価

本研究では、影を操作することで実影によるアニメーションを生成し、その影の保存、再生を可能にする点に特徴を有することから、アニメーション再生における時間的精度について評価実験を行う。評価実験は、図 5.3 のように 3 種類の操作に対して、操作にかかる時間と再生にかかる時間をそれぞれ計測し、比較することで実施する。プログラム内で操作開

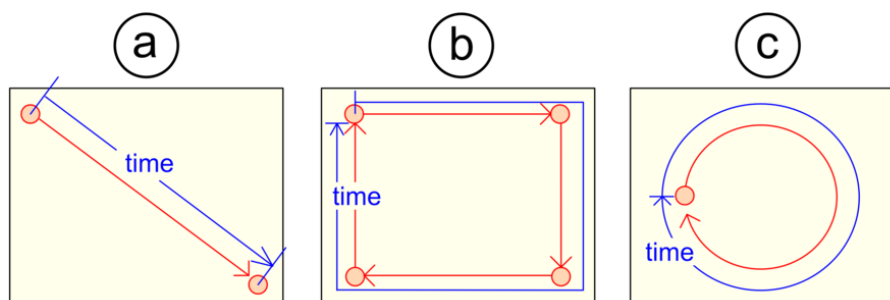


図 5.3: 評価実験に用いる操作

表 5.1: 時間的精度の評価結果 (秒)

操作	回数	操作時間 (t1)	再生時間 (t2)	t1-t2
直線 (図 12.a)	1 回目	6.774	6.815	-0.041
	2 回目	6.689	6.696	-0.006
四角 (図 12.b)	1 回目	15.844	15.876	-0.032
	2 回目	14.191	14.246	-0.054
円 (図 12.c)	1 回目	18.343	18.347	-0.004
	2 回目	15.358	15.356	0.002

始時にタイマーを起動し、操作終了時までの時間を計測する。そして再生時に再びタイマーを起動し、再生終了までの時間を計測する。計測した 3 つの操作の操作時間及び再生時間の結果を表 5.1 に示す。表 5.1 の全ての操作において、誤差は 0.1 秒以下であった。この結果から、影のアニメーション再生にかかる時間は、操作にかかった時間とほぼ等しいことが解る。

5.3.3 システム評価の結果

実影による時間軸を有する情報 (アニメーション) の編集・保存・再生に関して評価実験を行なった。本稿の提案手法は、影絵の編集・保存・再生を対象としていることから、空間的

再現性の評価は目視により行い、編集と出力に大きな差が見られない結果となった。また、物体の速度は内部処理により減速され、素早く操作をしようとする、追従速度を超過してしまう結果となった。今後の課題として、内部処理による遅延も考慮しモーターの性能向上やモーター制御の方法を検討する必要がある。しかし、再生時の時間的再現性は直線運動、円運動共に、操作時と再生時の時間差が0.1秒以下と再現性が高いことが示された。この結果から、Augmented Shadow Mediaにより、影の直線・曲線移動、拡大縮小といった影絵の基礎的な動作について、編集・再生・保存が可能になったと言える。

5.3.4 考察

システムの評価結果からモーターの性能向上やモーター制御の方法を検討する必要があることがわかった。また、今回影絵のアニメーションを生成するために使用した物体には、球体を使用した。人形のような形状ではどのような操作が要求されるのか実験する必要がある。人形影絵の動きに必要な操作を選定し、実装することで、影の表現領域も広がり、人形影絵の動きも保存が可能になる。そのためには、今回の実験データを元にモーターの性能向上や、制御方法を検討する必要がある。PID制御などを使用することで滑らかな移動が可能になると考える。人形影絵の実装が可能になれば、インドネシアの人形影絵であるワヤンクリなど、文化的価値のある影絵のデジタルアーカイブに応用可能であると考え。影絵のデジタルアーカイビングに応用することで、従来の映像として保存する方法とは異なる、新しい保存方法として提案することが出来ると考える。

また、本研究の芸術的特徴は、実影を操作し物体に変化を与えるインタラクションを通し影の変化をCGを用いず物体の3次元空間における物理的变化によって表現する点にある。これまで実影を使用した芸術作品は多数存在するが、体験者のリアルタイムな操作に連動させた実影のみの表現は存在せず、その点において本研究は新規性を有している。また、実影を操作することによる物体の動きの表現は、影の変化だけでなく、体験者の2次元平面に対する操作を立体的に表現している。さらに、付随して変化する実影は、体験者の操作を物体の3次元的動きで表現するだけでなく、2次元的にも表現していると言える。既存の影を用いたインタラクション作品には、このような影の2次元表現と物体の3次元表現を同時に表現する作品は見られず、本研究はそのインタラクションを実影と物体で構成される実世界に実装している点で新規性を有する。そして、インタラクティブな操作から生成保存される軌跡の情報には、物体の三次元座標だけでなく、影の二次元座標、影のスケール、そこから想起される体験者のジェスチャーが含まれ、それら情報を影のアニメーションとして鑑賞することが出来る点も芸術的特徴と言える。

5.4 本章のまとめ

本章では、実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 Augmented Shadow Media を提案した。また、複数ジェスチャによる物体の三次元移動システムを応用した事で、物体の3次元移動インタラクションを影絵の操作へ応用可能とした。これにより、影の上下左右の移動に加えスケールの変化によって実影によるアニメーションを作成し、影のアニメーションの保存と再生の手法を提案することが出来た。今後は、本研究をさらに発展させ、操作の改善や幅広い物体に対応出来るような仕組みを提案したいと考えている。そして、本研究をさらに発展させることで、伝統的影絵のデジタルアーカイビングに応用可能か検討していく。

第6章 KUIを用いた3Dモデリングと デジタルファブリケーションへの応用

前章では、KUIの発展として、Augmented Shadow Mediaを提案した。Augmented Shadow Mediaでは、KUIの操作を複数組み合わせる事で、影に対する操作から物体の3次元移動を可能にする操作方法を提案し、その手法を用いたシステムによって影絵の編集、保存、再生を可能にするインタラクションについて述べた。

本章では、KUIの応用として、影を操作して物体の3次元位置を変更することで発生する軌跡を用いて3Dモデリングを可能にする手法「KUI Based Modeling」を提案し、その手法とスマートフォンARを用いる事で、複数人でモデルを観察可能なデジタルファブリケーションシステムとして「FabKUI」を提案する。

6.1 KUI Based Modelingについて

6.1.1 HCI分野における3Dモデリング研究の動向

近年、安価な3Dプリンターの登場やMaker'sムーブメントの浸透、DIY文化の流行により、一般の人でもツールを扱い物作りを行う機会が増えてきた。また、HCI研究の分野でもデジタルファブリケーション支援の研究として、3Dプリンタの新しい使用法[61]の提案や、直感的な電子工作ツール[62]、3Dモデリングを支援する研究[63]がなされている。中でも3Dモデリングを支援する研究では、VRデバイスを使用した3Dドローイングアプリケーション[64]や、実際のブロックを積み上げるモデリング手法[65]、ロボットアームを用いたモデリング手法[66]などが提案されている。このように現在デジタルファブリケーションの分野においてもHCIの観点からインタフェースの提案や、エンターテインメント領域での活用など新しいデジタルファブリケーションの応用がなされている。このような背景の中、著者が提案してきたKUIのインタフェースでは、前章で述べたように複数の操作を組み合わせる事で物体の3次元位置の変更が可能になった。この物体の三次元移動による軌跡を用いる事で3Dペン[67]の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た。

そこで本研究では、KUIを応用した実世界指向3Dモデリングの手法として「KUI Based

Modeling」を提案する。提案する KUI Based Modeling を図 6.1 と図 6.2 に示す。本手法では、KUI を用いて物体を移動させ、その物体の移動した軌跡によって 3D ペンのようなモデリングを可能にする。従来のモデリング手法では、マウスをインターフェースとしてプリミティブオブジェクトを追加したり、オブジェクトの面や辺を変形させることでモデルの生成を行う。また、従来手法ではカメラ視点の変更やコマンドキーを使用することでより高度なモデリングを可能にするが、同時に操作することの複雑さや 3 次元空間の認識が困難なことも挙げられる。本手法では、実空間のオブジェクトを移動させモデリングを行うことで生成モデルの空間的スケール認識が容易になり、カメラ視点の操作やコマンドキーの入力が不要になる。本節では、提案するモデリング手法のシステム構成、実装方法について述べる。

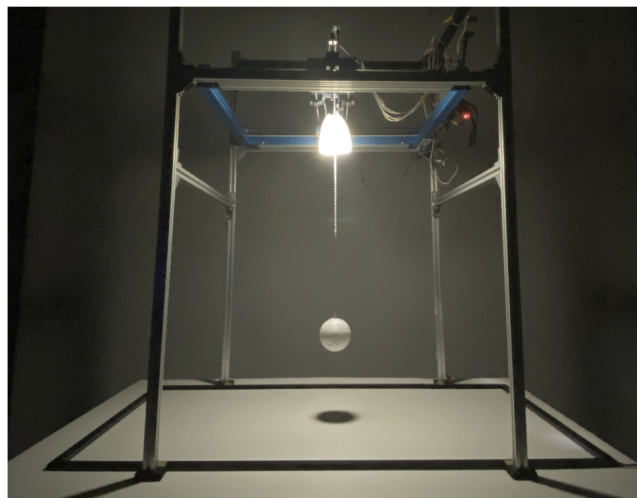


図 6.1: KUI Based Modeling

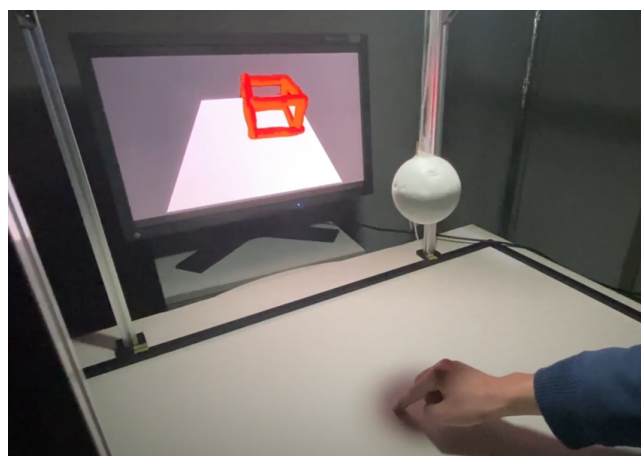


図 6.2: KUI Based Modeling の操作の様子

6.1.2 システム構成

KUI Based Modeling のハードウェア構成は、影へのタッチ検出、物体の水平移動機構、物体の垂直移動機構の3つに分類される。タッチ検出には、図 6.3 のようなタッチパネルモジュールを使用し、指が操作面に触れたかを判定する。そして影の範囲内に指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ーの判別を行う。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行う。Augmented Shadow Media のタッチ検出システムでは、FTIR タッチパネルを制作し赤外線カメラを用いて影へのタッチを検出していたため、カメラ性能や赤外線 LED の配置間隔によってタッチの検出精度に偏りが出ていた。本システムでは、タッチパネルモジュールを使用し、TUIO 通信にてモジュールから指の座標データを取得することで、安定しタッチ検出を行う。

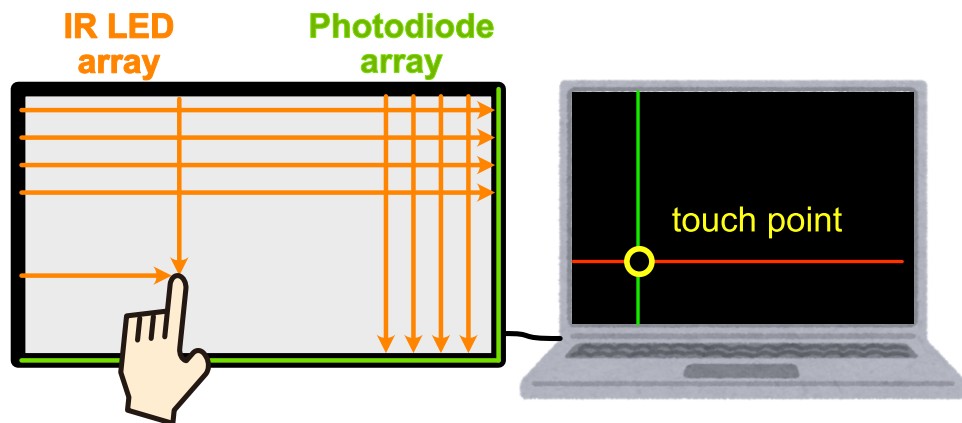


図 6.3: タッチパネルモジュール

物体の水平移動機構は Augmented Shadow Media でも使用した XY プロッタを採用する。垂直移動機構は新たに図 6.4 のようなラックアンドピニオン方式を用いた機構を採用する。以前の機構では、滑車とワイヤーを用いたことで、水平移動時に揺れが発生していたが、KUI Based Modeling で採用する機構はピニオンとラックが固定されているため水平移動時の揺れを軽減することが可能となる。また、ギア比を変更することで、より細かな垂直移動制御を行なうことも可能になる。

タッチパネルモジュールによって影へのタッチ検出を行い、影への操作によって物体を動作させるため移動機構を動作させる。そして 3D モデルの生成システムは、プログラム内で構成され、ユーザーの操作開始と共に、操作による仮想の影領域の直径と xy 座標の変化を記録し保存する。操作終了時に記録されたデータから直径の変化を物体の z 座標に変換し、xy 座標のデータと合わせプリミティブオブジェクトを 3D 空間に配置していく。最後にプリ

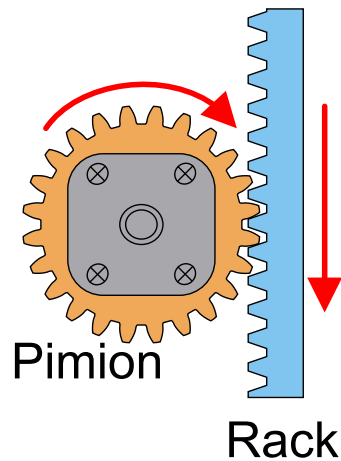


図 6.4: ラック& ピニオン機構

ミティブオブジェクトの重なりを合成し 1 つの 3D モデルとして出力する．システムの動作フローを図 6.5 に示す．

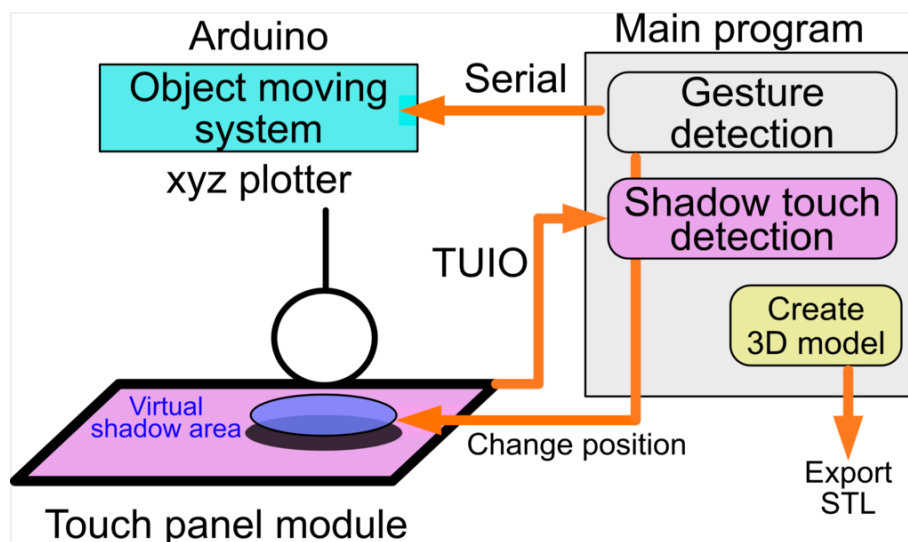


図 6.5: システムの動作フロー

6.1.3 操作方法とインタラクション

KUI Based Modeling では，影からの操作で物体を 3 次元移動させ，その移動した軌跡から 3D 形状を作成する事で 3D モデリングを行なう．そのため，物体を 3 次元移動させる操作に，3 章で提案した複数ジェスチャによる物体の三次元移動システムで使用した操作を採用する．物体の垂直方向の移動にピンチジェスチャ，物体の水平方向の移動にドラッグジェ

スチャを採用する。物体と光源の位置も同様に、光源の真下に物体を配置し、物体の移動に伴い光源も移動する様に設計する。これにより、影の位置や大きさの変化を一定に保つ事が出来る。また、3D ペンで描く様な柔軟なモデリング操作を提供するために、ピンチジェスチャとドラッグジェスチャの同時操作を実装する。この同時操作により、物体を水平方向に移動させながら、垂直方向へも移動させる事が可能になり、垂直方向に滑らかな曲線を描く事が可能になる。ピンチジェスチャとドラッグジェスチャの同時操作は、2本の指でピンチしながらドラッグする操作になる。さらに、3本の指でピンチジェスチャとドラッグジェスチャを行なう事で、3D モデルを生成せずに物体だけを移動させる動作を実装する。これにより、複数の3D モデルを一度の作業で作ることが可能となる。KUI Based Modeling で実装する操作を図 6.6 に示す。

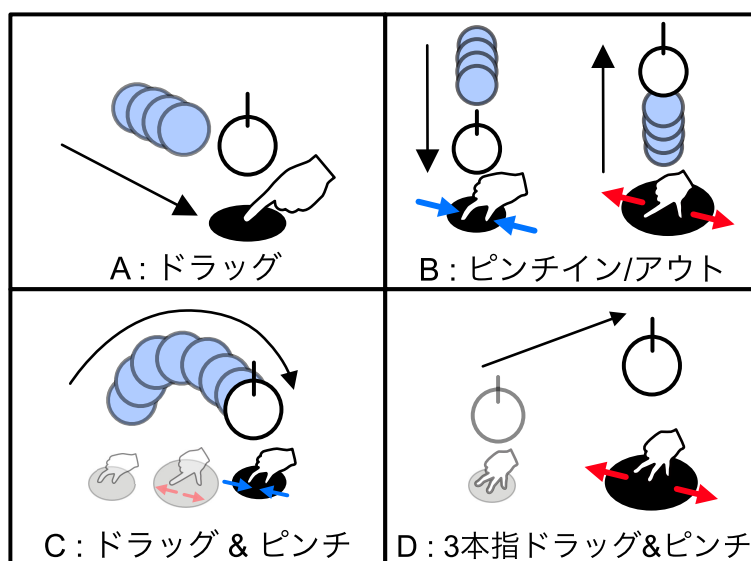


図 6.6: 4つのジェスチャ操作

6.1.4 システムの実装

(1) タッチパネルモジュールによる影のタッチ検出

メインプログラムを制御するメインコンピュータと影へのタッチ検出を行うタッチパネルモジュールは有線接続され、TUIO 通信にて指の座標を最大10点まで取得することが出来る。影の判定領域はメインプログラム内にあらかじめ仮想の影領域を設定する。この影領域は、予め設定された物体の最高位置と最低位置から影の最大直径と最小直径を計測し、現在の物体の高さから影の直径を計算し、仮想の影領域に設定する。タッチパネルモジュールから得られた指の座標が仮想の影領域内に入っていた場合にのみジェスチャ入力を受け付け

る．判定領域内でジェスチャが行われると，ジェスチャに合わせ影の判定領域も位置を変化させる．タッチ検出された指が1本であればドラッグジェスチャとして認識され，2本認識された場合ピンチジェスチャとして認識される．また，2本指でピンチジェスチャとドラッグジェスチャを組み合わせることで物体を垂直移動させながら水平方向にも移動させることが可能になり，三本指でピンチジェスチャとドラッグジェスチャを行う事で，3D モデルの生成は行わずに実空間の物体だけを移動させる事が可能である．

(2) 物体の移動機構

影の判定領域の位置と実際の影の位置を合わせるため，影の判定領域の位置が変化すると共に，実世界の物体の位置を仮想判定領域と一致するように移動させる．これを実現するために，物体の水平方向の移動には図 6.7A の XY プロッタを使用し，垂直方向の移動には図 6.7B のラックアンドピニオン方式を用いた移動機構を制作する．XY プロッタは X，Y 軸ごとにステッピングモータとモータードライバを使用し，同じく垂直移動機構にもステッピングモータとモータードライバを使用し制御する．XY プロッタと垂直移動機構は1つの Arduino マイコンボードに接続し制御する．この Arduino マイコンボードと影のタッチ判定を行うメイン PC は有線接続し，メイン PC から影の判定領域の位置の変化量を Serial 通信にて送信し，マイコンボード側で各ステッピングモータのステップ数に変換し，モータを制御することで物体の移動を行う．

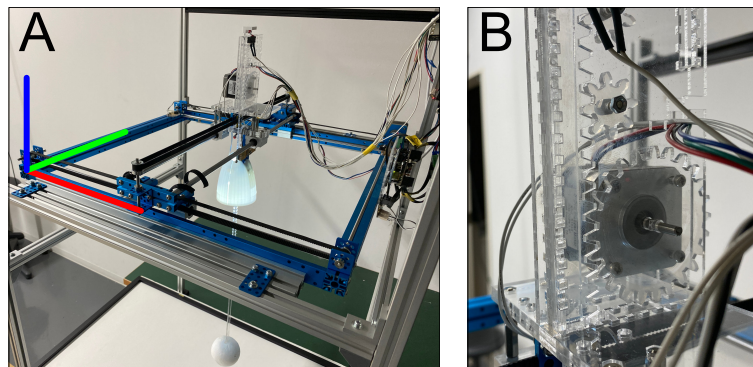


図 6.7: 実装した物体の移動機構

(3) 3D モデルの生成

ジェスチャが認識され物体を移動させる際の 3 次元座標データを一時 CSV データとして保存する．ユーザの操作終了時に，保存した CSV データから 3D モデルを生成する．座標

データごとにプリミティブな球体オブジェクトを配置し、物体の移動した軌跡を再現する。球体オブジェクトの重なり部分を結合し、STL フォーマットに出力する事で、一体の 3D モデルを生成する。

6.1.5 システムの統合と動作実験

動作実験で使用する PC は Windows10(intel Core i5 -10300H) を使用し、移動機構を制御するマイコンボードには Arduino Uno(ATmega328) を使用する。タッチパネルモジュールの大きさは横 800mm, 縦 550mm であるが、物体の移動機構の大きさに合わせ、ユーザの操作可能範囲は横 600mm, 縦 550mm の範囲に制限し、物体の移動可能範囲は横 500mm, 縦 400mm, 高さを 100mm から 400mm の間に制限する。図 6.8 のように生成される 3 D モデルをディスプレイでリアルタイムに確認することが出来る。図 6.8A は水平方向移動, 図 6.8B は垂直方向移動, 図 6.8C は水平+垂直方向移動の操作を示している。図 6.8C のように、ピンチインピンチアウトを繰り返しながらドラッグすることで、サインカーブのような表現も可能となる。3D オブジェクトを生成出来るこれらの操作に加え、3 本指でのピンチ&ドラッグジェスチャにより、物体の位置変更を可能にし、3D モデリングを行なう事が出来る。

実際に KUI Based Modeling にて 3 次元形状をモデリングしている様子を図 6.9, 図 6.10 に示す。図 6.9 では、平面的なハートの形状をモデリングしている。ペインティングをする様に形状を描く事が出来ため、このような平面形状は KUI Based Modeling でのモデリングに適していると思われる。また、図 6.10 では、立体的な椅子をモデリングしている。立体的な形状でも、従来のモデリング操作の様に、複雑なマウス操作やキーコマンドを用いることなく、立体的な形状を作成する事ができている。

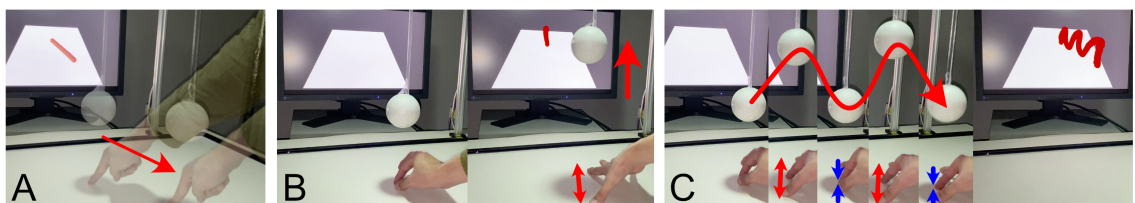


図 6.8: 3D モデリングを可能にする 3 種類の操作
(A:ドラッグ, B:ピンチ, C:ドラッグ&ピンチ)

生成した 3 D モデルを 3 D プリンタで出力したものを図 6.11 に示す。全体の大きさは 3 D プリンタで出力できる範囲に修正した。図 6.11 のように平面的な形状から立体的な形状

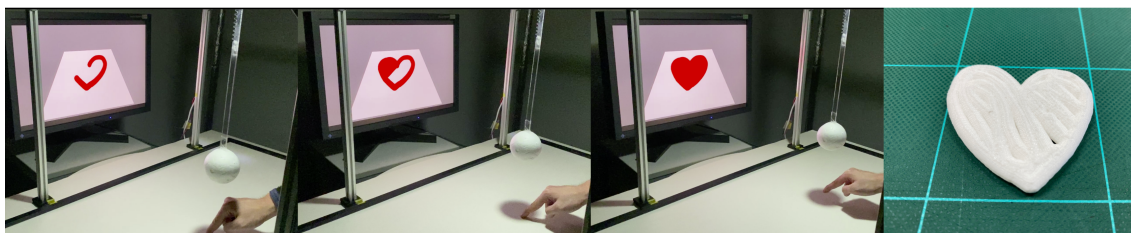


図 6.9: モデリング例：ハート

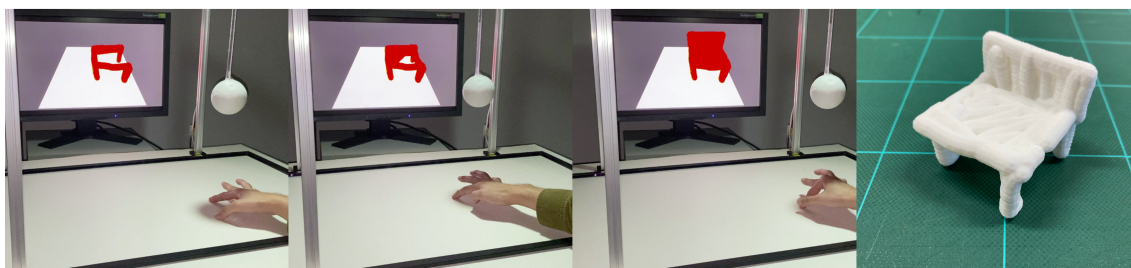


図 6.10: モデリング例：椅子

まで表現することが出来ている．また，物体の実空間位置とディスプレイに表示される CG から，生成させる 3D モデルの形状を確認することが出来るが，ディスプレイ内の 3DCG は現在正面方向からしか確認することができない．改善案として，モバイル AR を使用し操作面上に 3DCG を重畳させることで，他視点から作成しているモデルの確認が可能になると考える．



図 6.11: 3D プリンタにて出力されたモデル (ハート，花，机，椅子)

6.2 FabKUI への応用

6.1 節にて、KUI を応用した実世界指向 3D モデリングの手法として「KUI Based Modeling」を提案した。KUI Based Modeling では、KUI を用いて物体を移動させ、その物体の移動した軌跡によって 3D ペンのようなモデリングを可能にし、実空間のオブジェクトを移動させモデリングを行うことでカメラ視点の操作やコマンドキーの入力が不要なモデリング手法を提案した。

KUI Based Modeling を提案し、そのシステム設計や実装方法、インタラクションの手法を示した事で、KUI を用いた物体の 3 次元移動のインタフェースにより、実世界指向な 3D モデリングが可能である事がわかった。本節では、この KUI Based Modeling の操作とモデルの確認に関する問題点を改善する共にシステムを発展させ、ファブリケーションスペースなどのパブリックなものづくり空間において、複数人で 3D モデルを観察可能なモデリング手法「FabKUI」を提案する。図 6.12 に FabKUI のシステムを示す。本節では、FabKUI の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、システム設計、実装方法について述べ、評価実験を行いその結果を示す。評価実験では、複数人で一つのモデルを作成した際に共同で作業を行なう事が出来たか、モデリング経験の有無に関わらず 3D モデルを作成する事が出来たか、を評価しその評価結果を示す。

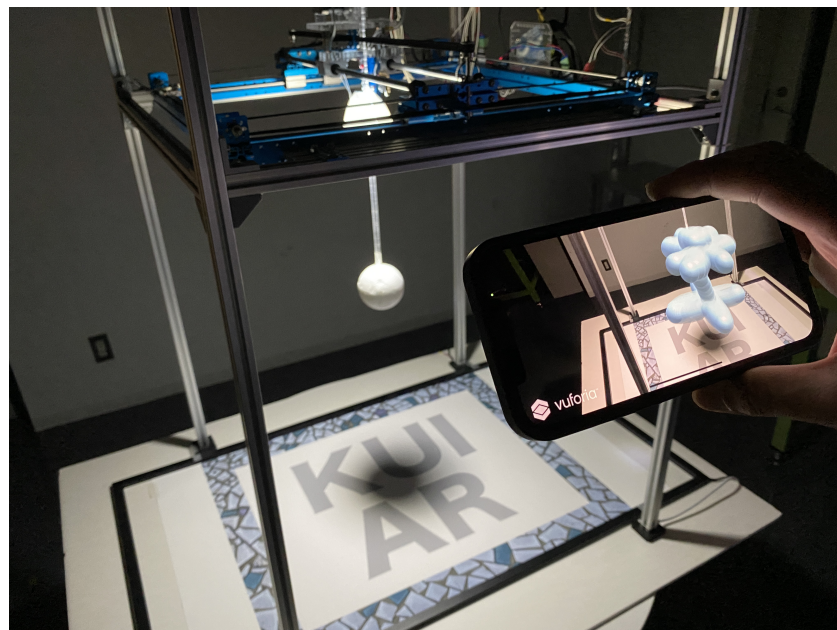


図 6.12: FabKUI のシステム

6.2.1 デジタルファブリケーションとモデリング環境の動向

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.” [68] という文章があるように, プログラミングをクリエイティブ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, ものづ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, ものづくり教室などで参加者が共同作業を通してものづくりを楽しむ機会が増えている. ものづ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となった. 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 [69][70][71] 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, ディスプレイ形状やサイズによって指向性の制限があり, オンライン上で共有する場合, 人数分の PC と開発環境が必要となり, 円滑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, FabKUI を提案する. また, 本研究では著者がこれまで提案してきた KUI の概念 [72] を用いる事で, スケッ

チを描くような感覚で直感的に 3D モデルを生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アーティストやデザイナー、さらには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、FabKUI に 360 度オープンな設計とスマートフォン AR を用いる事で、対面にてディスプレイを隔てる事なく、複数人で 3D モデルを観察しモデリング作業をする事が可能になる。これにより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。

6.2.2 FabKUI の関連研究

(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 Situated Modeling[73] では、AR マーカデバイスを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[74] 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[75] 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[76] 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[77] 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られる。FabKUI 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、FabKUI 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。FabKUI 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。

(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[78] 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 [79] 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 [80] 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[81] や、Siu らの ShapeCAD[82] 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[83] 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 FabKUI 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잉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。

6.2.3 FabKUI の設計とシステム実装

著者が考える FabKUI のモデリング概念は、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。FabKUI 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。

(1) システム構成

FabKUI 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 モデリング手法を提案する。FabKUI のシステムは、KUI Based Modeling のシステムを基にして実装している。FabKUI のシステムは、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モジュールを使用し、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 6.13 のように操作面となるテーブル上にタッチパネルモジュールを配置し、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、ユーザーの影で物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モジュール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。

ジェスチャによる物体移動は、タッチパネルモジュールにて検出された指の位置とジェスチャの種類によって物体の3次元位置を変化させる。物体の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6.13のように物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、物体と同形状、同スケールの3Dオブジェクトを実空間の物体と同じ位置になるように3D空間に配置する。物体の移動と連動し、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、物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、物体の軌跡の3Dモデルを出力する事が可能となる。図6.13に提案手法のシステム構成を示す。

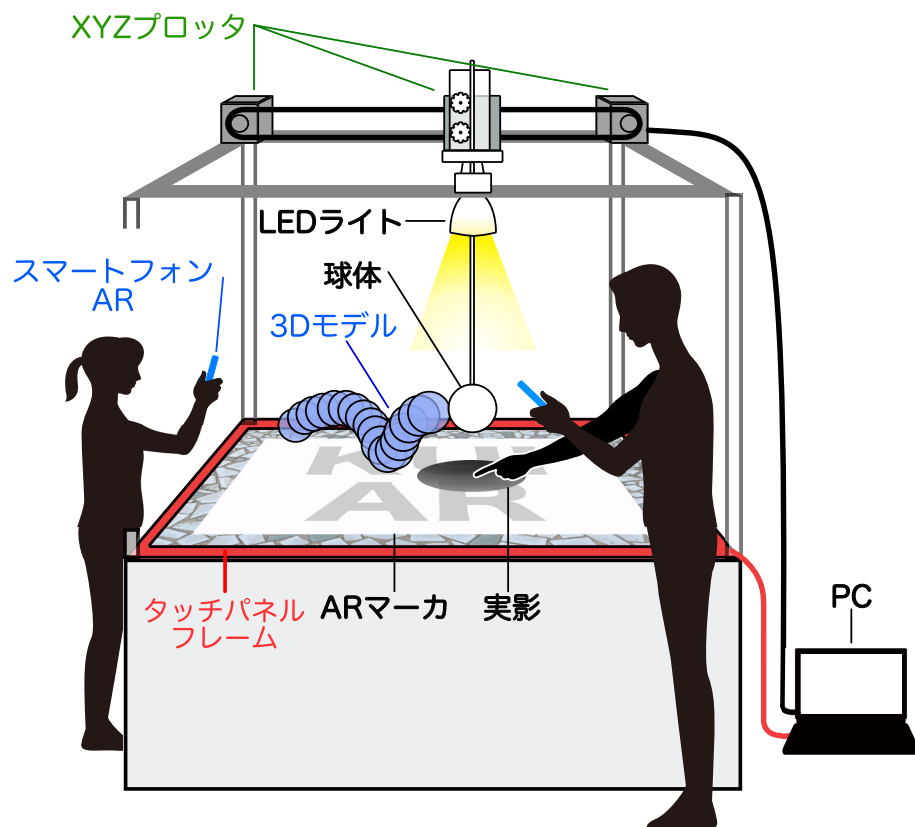


図 6.13: FabKUI のシステム構成図

(2) 操作方法

提案手法の操作方法として、6.1 節で提案した KUI Based Modeling に準拠し、物体の水平方向移動には、1 本指でのドラッグジェスチャを、垂直方向の移動には、2 本指でのピンチジェスチャを採用する。また、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、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物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物体の三次元移動を可能にし、その物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 3D モデルを確認する事ができる。

(3) AR 機能の実装

スマートフォンとマーカ型 AR を用いて、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モジュール枠内に 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、実空間における物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 表示上では物体が動いた位置に 3D オブジェクトが生成される。本手法の構造は図 6.13 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。

物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物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、物体の移動可能範囲がタッチパネルモジュール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。

6.3 動作実験

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 6.14 に示す。また、著者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 6.15 に示す。図 6.15 のように立体形状や、平面的な形状、キャラクター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 6.16 にスマートフォンを複数台使用した共同制作の様子を示す。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、FabKUI 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。

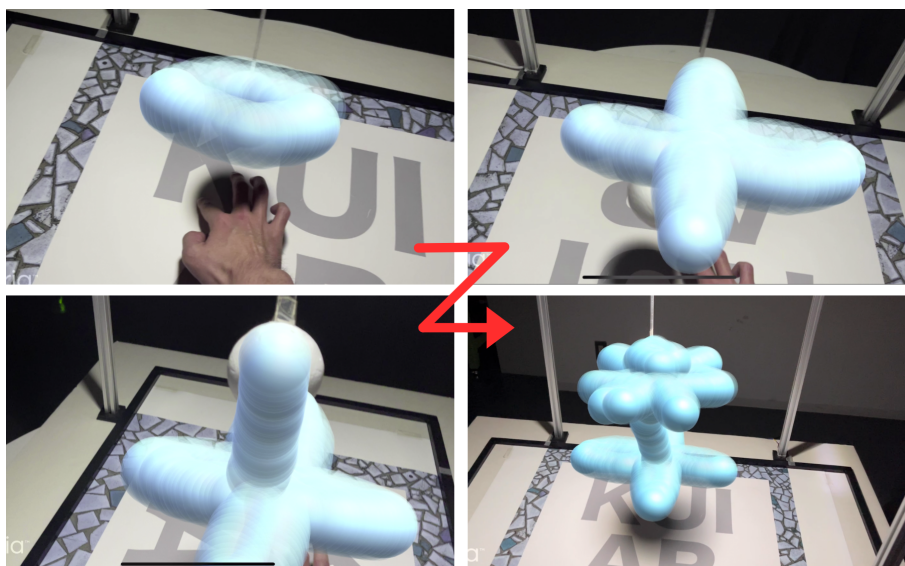


図 6.14: 3D モデル作成中の様子



図 6.15: 作成した 3D モデルと 3D プリントの結果

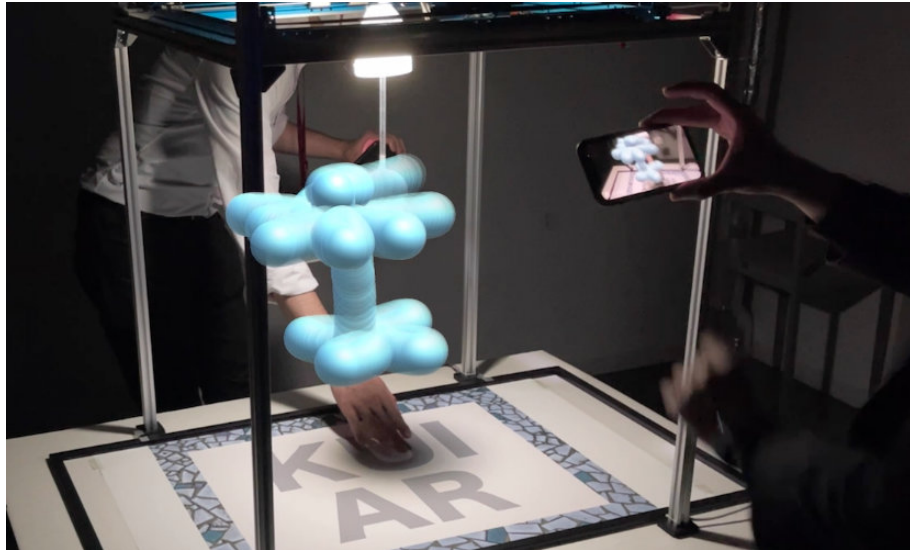


図 6.16: スマートフォン画面のキャプチャ画像

6.4 評価実験

FabKUIで提案する3Dモデリング手法は、初心者でもアイデ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、影と物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う。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。

6.4.1 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 6.1、表 6.2、表 6.3 にそれぞれ示す。回答は中央値を無くするため 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 6.1 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、物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、影から物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 6.2 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 6.3 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、実世界のカーソルの役割を持つ物体など、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 6.1: 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	影への操作と物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 6.2: 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 6.3: 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・物体・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

6.4.2 評価結果

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 6.17, 図 6.18, 図 6.19, 図 6.20 に示す. 図 6.17 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物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. 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 6.17 の結果から, 影と物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, 意図した位置に物体を移動させ, 3D オブジェクトを作成する事ができたと言える. 図 6.18 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 6.19 のグラフは、AR の視認性 Q1 に関する全体評価を示し、図 6.20 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 6.20 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える。

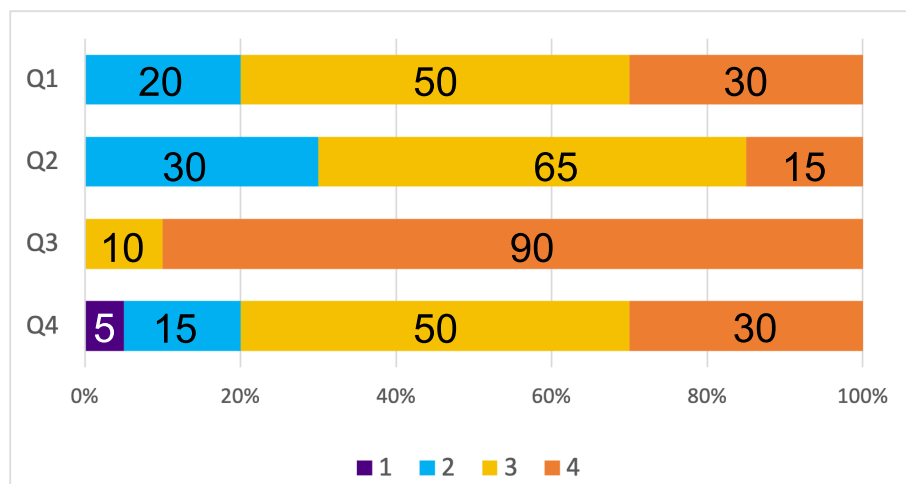


図 6.17: インタフェースの操作性に関する全体評価

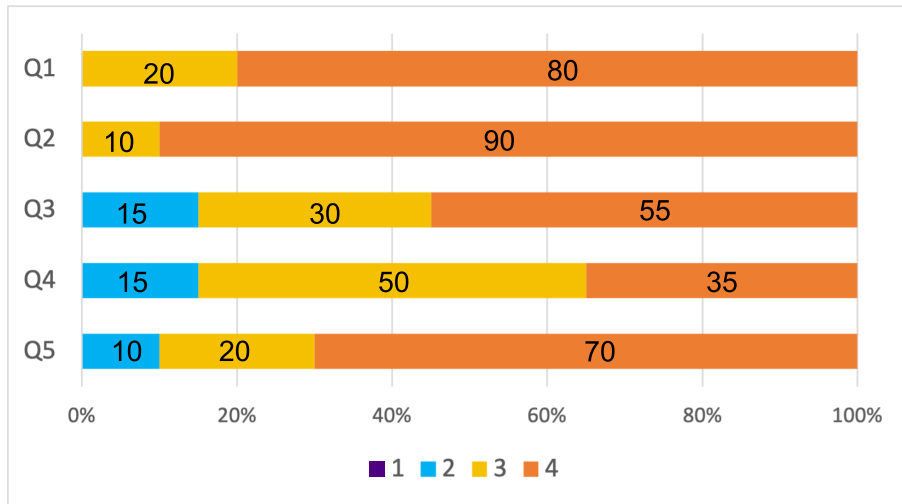


図 6.18: 共同作業性に関する全体評価

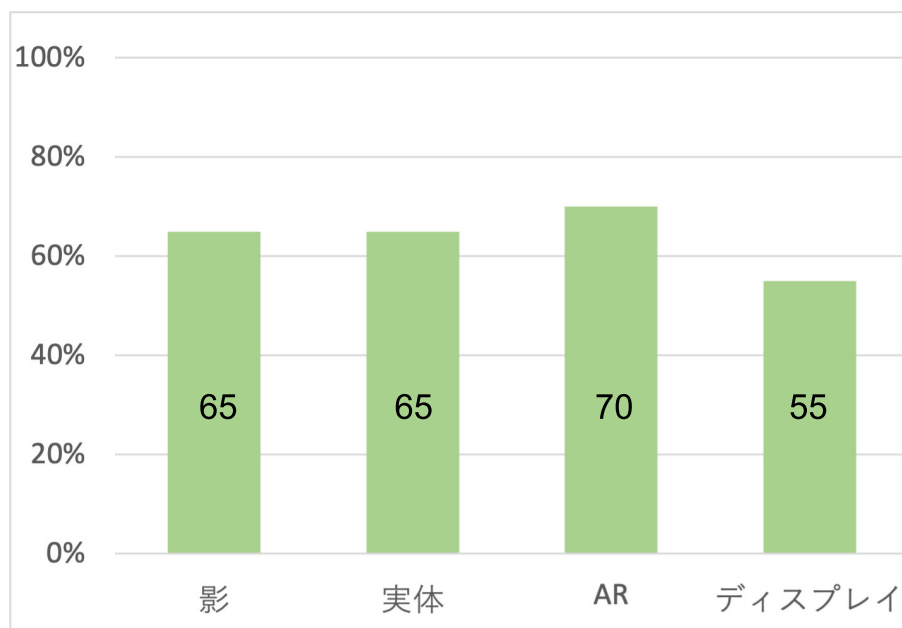


図 6.19: AR の視認性 Q1 に関する全体評価

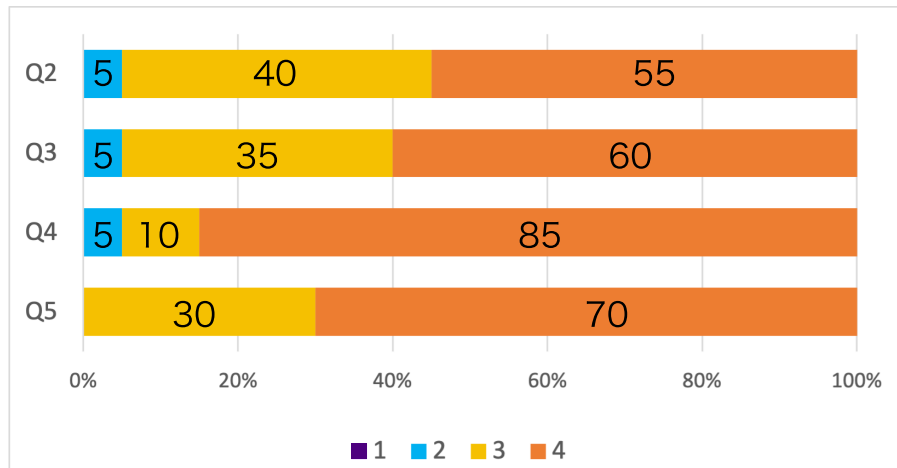


図 6.20: AR の視認性 Q2 から Q5 に関する全体評価

図 6.21 から図 6.23 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 6.24 から図 6.26 のグラフは回答の平均値をモデリング経験あ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 6.17) 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 6.21 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 6.18) 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 6.22 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 6.25 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 6.20) 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 6.23 やモデリングの有無で比較した図 6.26 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。

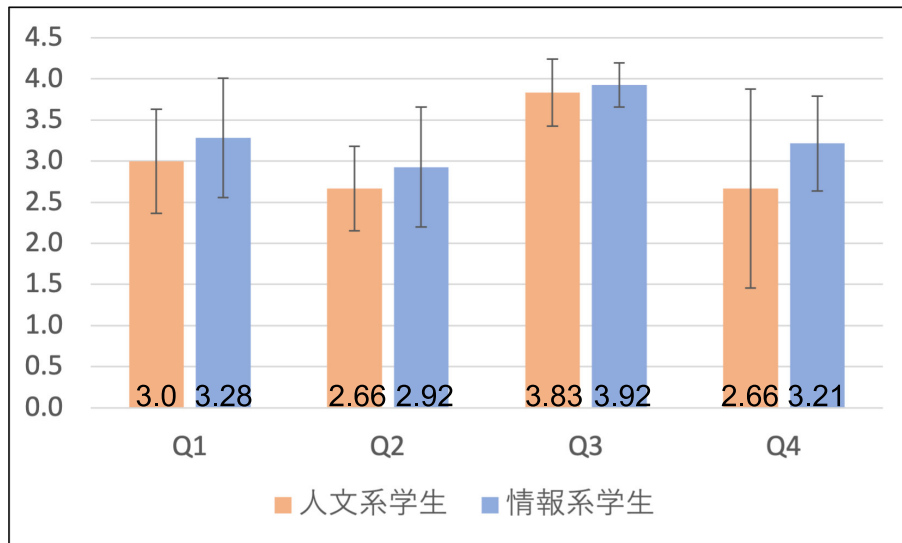


図 6.21: 人文系学生と情報系学生によるインタフェースの操作性に関する評価
(人文 [6 名], 情報 [14 名])

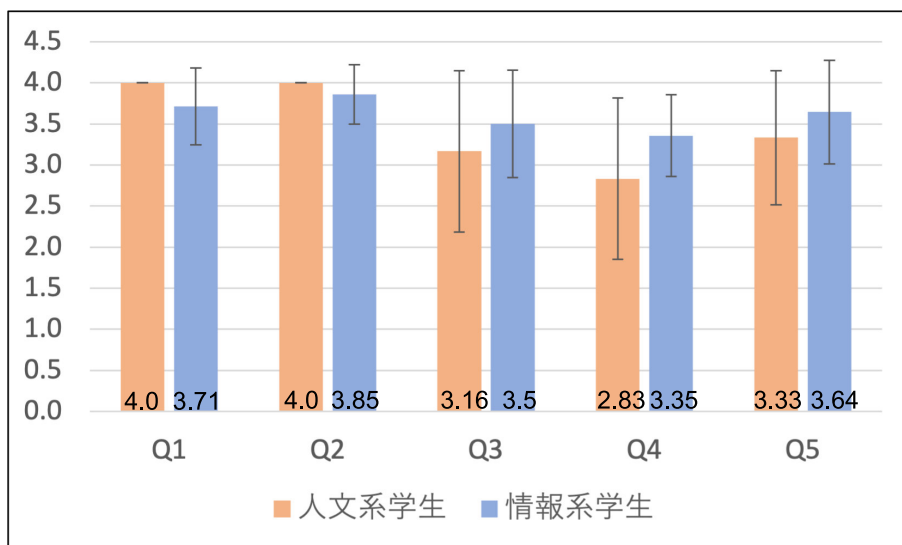


図 6.22: 人文系学生と情報系学生による共同作業性に関する評価
(人文 [6 名], 情報 [14 名])

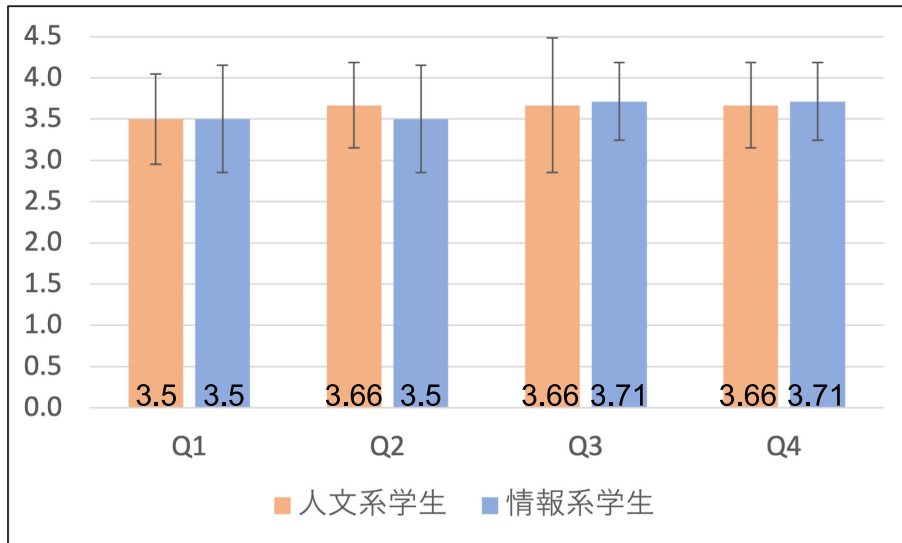


図 6.23: 人文系学生と情報系学生による AR の視認性に関する評価
(人文 [6 名], 情報 [14 名])

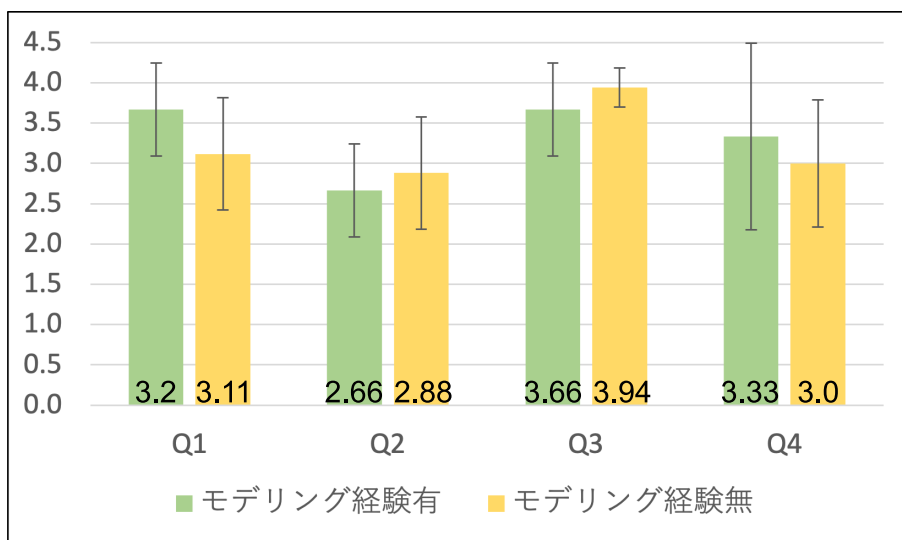


図 6.24: モデリング経験の有無によるインタフェースの操作性に関する評価
(経験有 [3 名], 経験無 [17 名])

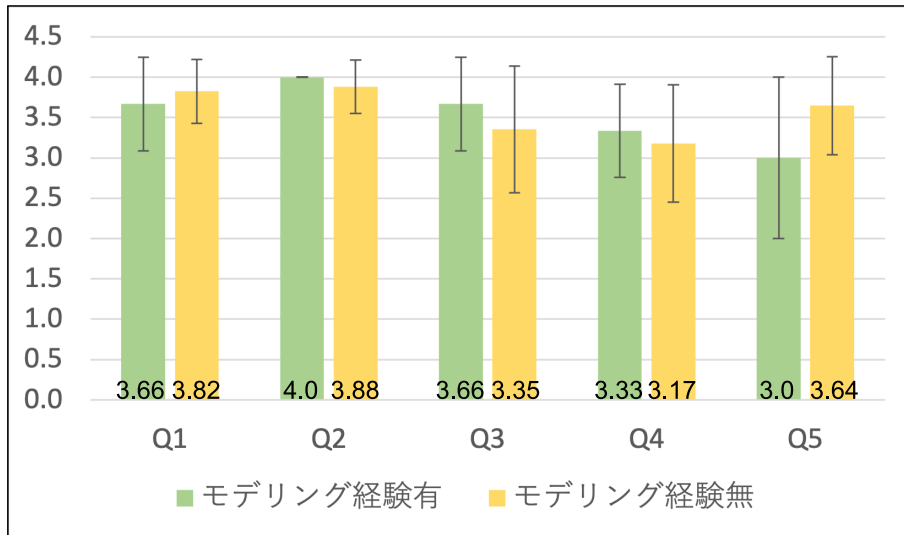


図 6.25: モデリング経験の有無による共同作業性に関する評価
(経験有 [3 名], 経験無 [17 名])

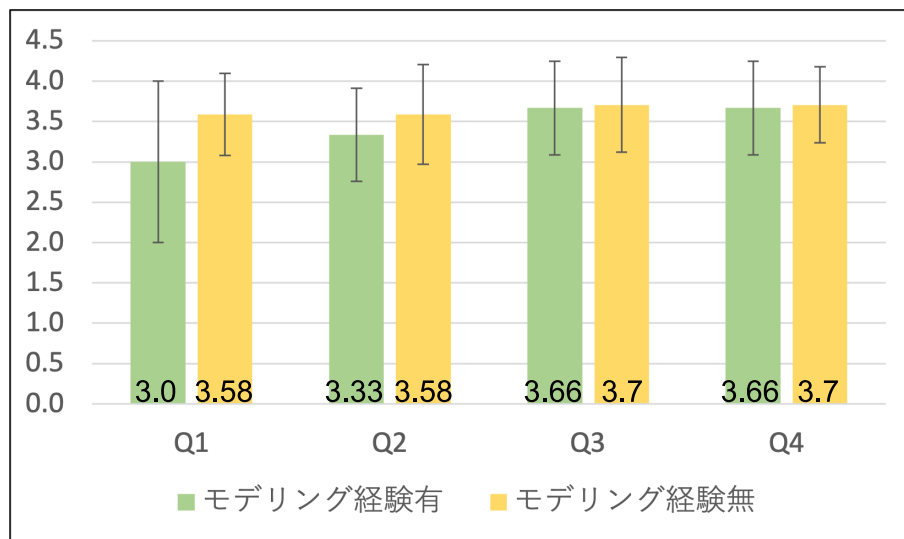


図 6.26: モデリング経験の有無による AR の視認性に関する評価
(経験有 [3 名], 経験無 [17 名])

6.4.3 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」「1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モジュール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 6.27 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。1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 6.27 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 6.27 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。

6.5 考察

提案する FabKUI の特徴である、影と物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

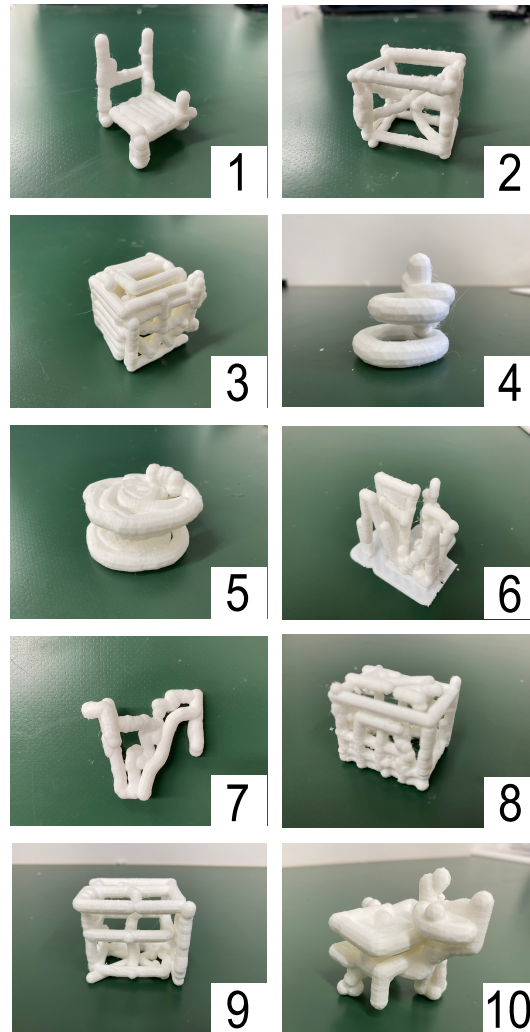


図 6.27: 被験者が制作した作品

であったが図 6.17 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 6.21 と図 6.21 のグラフ Q2 からわかるように、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 6.18 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 FabKUI 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 6.20 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、小型ドローンを物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。

6.6 本章のまとめ

本研究では、影への操作と物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.

第7章 KUIを用いたメディアアートと 影の芸術表現への応用

本章では、影を用いた実世界指向インタフェースとして提案した KUI の影の芸術表現への応用手法について述べる。本章で扱う影の芸術表現とは、主に影を扱ったメディアアート、インタラクティブアート、インスタレーションを指し、それら作品における影の表現手法や、作品の技術的なアプローチを対象とする。そして、本研究では KUI の応用手法が影の芸術表現において、新規性や技術的有効性があることを示す。

KUI の芸術分野への応用手法として、本稿では、「Animated KUI」[84] と「KUI Based Puppet」[85] の二つの影を用いた表現手法を提案する。Animated KUI は、影のアニメーションコンテンツ (以降、影アニメーションとする) を直接操作しアニメーションの再生・停止・逆再生操作を可能にする。Animated KUI では、影アニメーションをゾートロープとストロボ効果を用いて生成し、その影アニメーションに対し、ユーザが直接触れて操作する事で、再生・停止・逆再生を可能にする。また KUI Based Puppet では、影アニメーションを生成する人形の形をした物体 (以降、人形型物体とする) の影を直接操作し、影アニメーションを直接編集、再生を可能にする。人形型物体の実影に対し、腕や足の影を直接操作して影アニメーションを直接編集・作成し、操作によって作成された影アニメーションを保存・再生する事が可能である。

7.1 実影の映像表現手法

影絵は古くから存在する映像表現の1つであり、人の手で影の形を作る「手影絵」や、人形を操作しその影でストーリーを伝える「人形影絵」などがある。これら影絵芝居では、影を作る実体とライトの位置関係を調節することで、影の大きさを容易に変えることができる。それによって、影の形状や大きさを変えるダイナミックな表現を可能にする点に特徴を有する。このような影の特性を生かした映像表現は影絵の他に、クリスティアーン・ホイヘンス (1629-1695) が発明した「Magic Lantern」[86] は光を通すインクでガラス板に絵を描きスクリーンに投影する手法でプロジェクション技術の元祖とも呼ばれている。日本でも江

戸時代に「影絵燈籠」や「現妖鏡」と呼ばれる Magic Lantern と同様に光の照射と遮蔽物により像を映し出す仕組みの投影機が輸入されている。

映像技術が発達した現代でも、メディアアートやインスタレーションなどの芸術分野において影の映像表現を用いる作品は多い。その例として、クワクボの「LOST #16」[87]では、日用雑貨や小物を空間に複数配置し、配置した物の間に移動式の光源を配置し移動させる事で、雑貨や小物の2次元形状をトレースした影が空間の壁に写し出される作品である。同じくクワクボの「エントロピア」[88]では、部屋の中央に割れた様な鏡が無数に配置され、上部の光源からの光を部屋の壁に反射し投影する作品である。一見無秩序に鏡が配置されているが、鏡から反射された光は部屋の壁に規則的に投影される作品である。また、真鍋は影絵のアニメーションを使ったインスタレーション作品「16 Forms」[89]を制作している。図7.3のこの作品は、3D プリントされた16体のダンサーのモデルを回転させ、ロボットアームの先に付けたLEDで影を作り出すインスタレーション作品である。踊っているダンサーの3Dモデルを16分割して3Dプリンターで印刷し、それら3Dモデルをターンテーブルの上に円形に配置し回転させることで、LEDを点滅させながら当てるとゾートロープのように影がアニメーションをして見える仕組みである。回転する3DモデルとLEDの点滅スピードが合うことによって、影のアニメーションが生成される。このように、映像技術やプロジェクション技術が未発達な中世から、技術が発達した現代においても、実影を用いた芸術作品や実影の映像表現を用いる作家は多い。しかし、CG技術が発達した現代において、CGによる実影を再現した表現や仮想の影とのインタラクションも可能であることから、メディアアートやインタラクティブアートでは、CGによる仮想の影を用いた作品も多い。

そのような背景のから、KUIの応用手法として「Animated KUI」[84]と「KUI Based Puppet」[85]の二つの応用システムを提案する。Animated KUIでは、「16 Forms」[89]の様にストロボ効果を利用し、ゾートロープ(回転する物体)から生成される影アニメーションをインタフェースとして、直接ジェスチャー操作を行い、影を生成する物体の回転動作を制御する事で、影アニメーションの再生・停止・逆再生操作を可能にする。これにより、古くから映像表現手法として用いられる影アニメーションを従来の映像再生操作のようにインタラクティブな操作を可能にする事ができる。KUI Based Puppetでは影アニメーションを生成する人形型物体の影を直接操作し、影アニメーションを編集、再生を可能にする。本作品では、人形型物体の実影に対し、腕や足の影を直接操作して影アニメーションの動きを直感的に作成する事が可能である。また、操作によって作成された影アニメーションを保存・再生する事が可能である。

このKUIの二つの応用手法により、現代のメディアアートやインタラクティブアートにおいて、実影を用いた新しいインタラクティブな影の映像表現が可能になると考える。



図 7.1: LOST #16[87]



図 7.2: エントロピア [88]

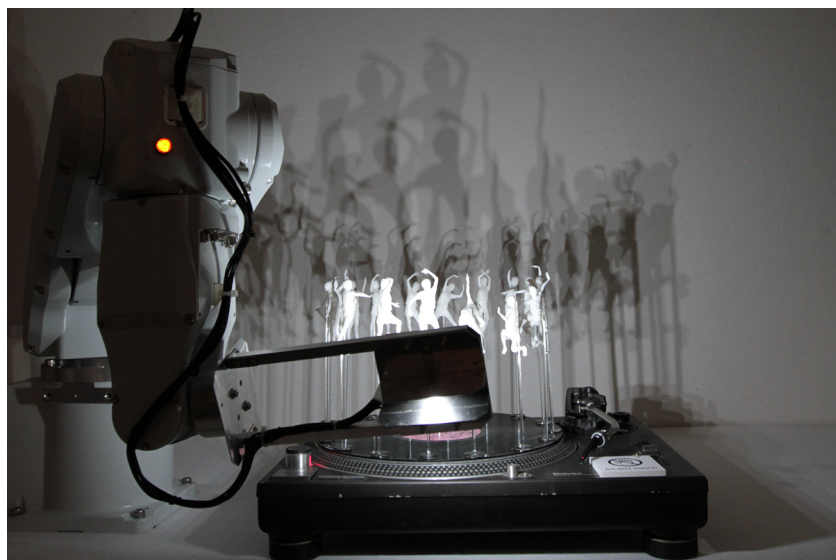


図 7.3: 16 Forms[89]

7.2 Animated KUIについて

本節では、KUI の応用表現手法として、影のアニメーションコンテンツ (以降、影アニメーションとする) を直接操作しアニメーションの再生・停止・逆再生操作を可能にする「Animated KUI」について、その実装方法と影アニメーションを操作するインタラクション手法について述べる。Animated KUI では、影アニメーションをゾートロープとストロボ効果を用いて生成し、その影アニメーションに対し、ユーザが直接触れて操作する事で、再生・停止・逆再生を可能にする。図 7.4 に Animated KUI のシステムイメージを示す。

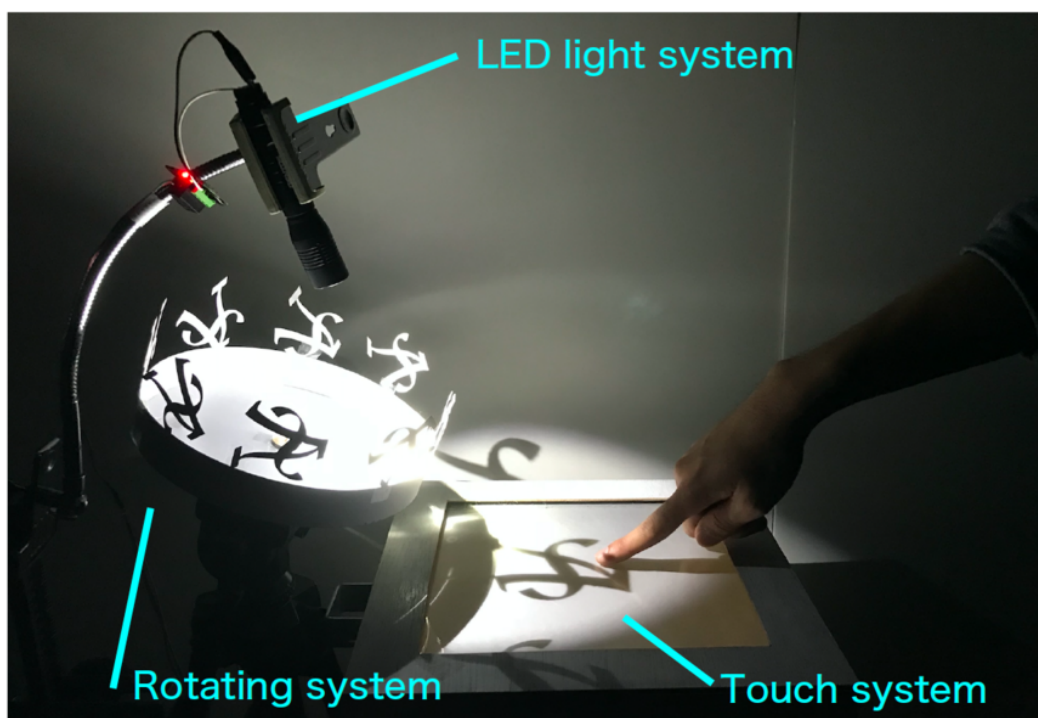
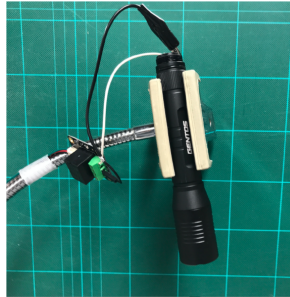


図 7.4: Animated KUI のシステムイメージ

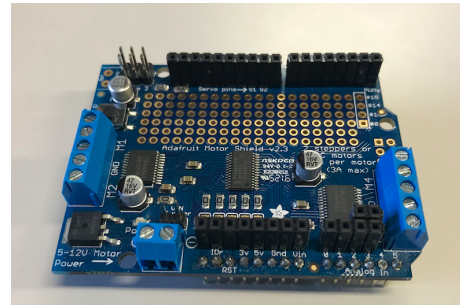
7.2.1 Animated KUI のシステム構成

Animated KUI は、回転する物体にストロボライトを当てることで発生するストロボ効果を用いて、物体の影アニメーションを生成する。影アニメーションの生成には、図 7.5 に示す影アニメーション生成システムの構成要素を用いる。図 7.5a に示すストロボライトは、LED 懐中電灯とリレーモジュールを組み合わせ、マイコンボードからストロボのタイミングを制御する事が可能である。マイコンボードは Arduino Uno を使用する。図 7.5b のモータドライバシールドを Arduino に装着し、DC モータを制御する。図 7.5c は影を生成する物

体であり、円周上にマークが並べられている。このマークは少しずつ角度が変化しているため、図 7.5c 物体を回転させ、ストロボライトを当てる事で、マークが回転する影アニメーションを生成する事ができる。この物体の中心に DC モータを取り付け、ストロボライトの点滅に合わせ回転速度を調整する事で、物体の影が回転している様に見える。図 7.5d に物体から投影される一つの影を示す。物体の回転速度と、ストロボライトの点滅速度は Arduino に繋いだボリュームスイッチで制御する。影へのタッチ検出は、3 章で述べた FTIR タッチパネルを用いて検出を行う。



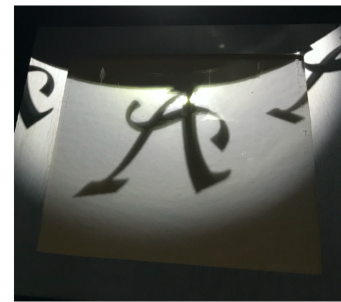
(a) ストロボライト



(b) モータドライバ Adafruit MotorShield v2



(c) Animated KUI に用いる物体



(d) 実際に投影される影の様子

図 7.5: 影アニメーション生成するシステムの構成要素

7.2.2 Animated KUI のインタラクションと映像表現

Animated KUI で使用するジェスチャー操作は、スワイプジェスチャーと、タッチジェスチャーを使用する。スワイプジェスチャーは、スワイプした方向に実体を回転させる操作として使用し、タッチジェスチャーは、回転している実体の回転を停止させる操作として用いる。図 7.6a のように左方向へスワイプすることで実体を左方向へ回転させ、アニメーションの再生を行う。また、図 7.6c のように右方向へスワイプすることで実体を右方向へ回転させ、アニメーションの逆再生を行う。そして図 7.6b 影のアニメーションにタッチすることでアニメーションを停止させる。影のタッチ検出を行う領域は、高速で影が回転することを考慮して、タッチパネルの影が投影される大まかな範囲を判定領域としてタッチ検出を行

う. FTIR タッチパネルにてタッチを検出した際に, 検出した指座標のフレーム間差分が閾値以上であればスワイプジェスチャと認識し, 座標の移動方向によって, 左スワイプ (再生) か右スワイプ (逆再生) のどちらか判定する. 実際に Animated KUI を操作している様子を 図 7.7 に示す.

Animated KUI の影アニメーションは, 図 7.8 の様にロゴが回転する様子を表している. 左スワイプ (再生) 操作をする事でロゴは時計回りに回転して見え, 右スワイプ (逆再生) 操作をする事でロゴは半時計回りに回転して見える. 回転する物体を変更する事で, 影アニメーションのコンテンツも自由に変更する事が可能で有る.

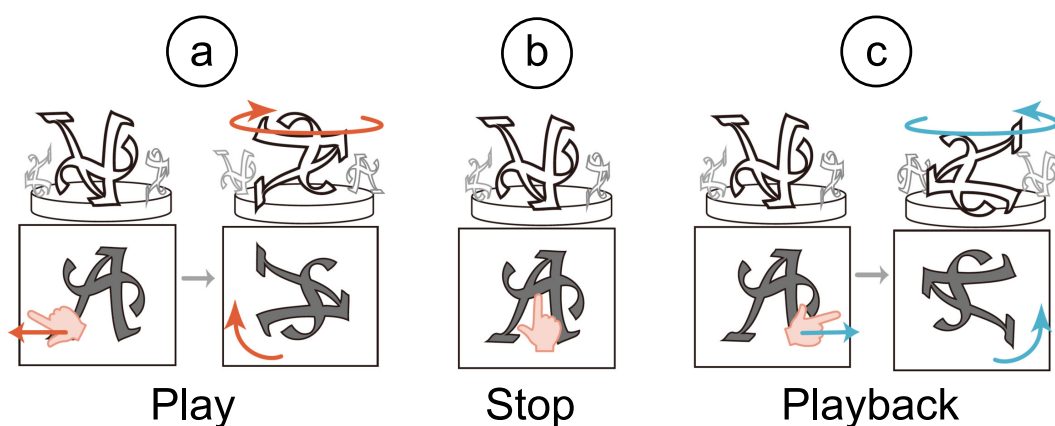


図 7.6: Animated KUI の操作とインタラクション

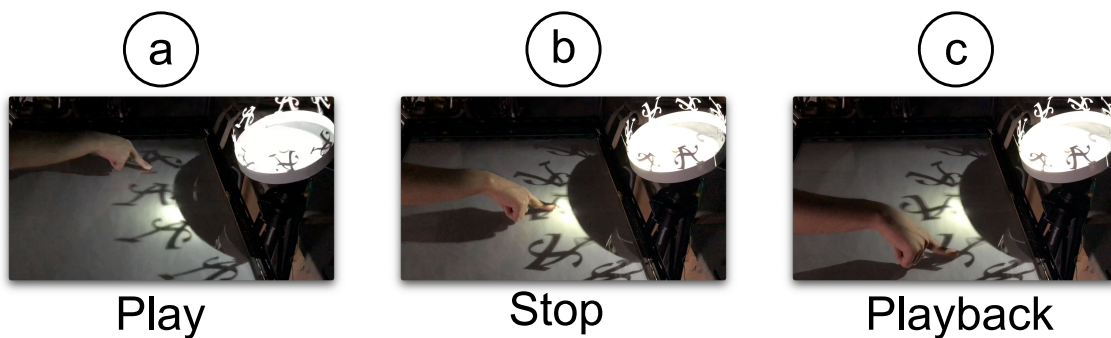


図 7.7: 実際の操作の様子

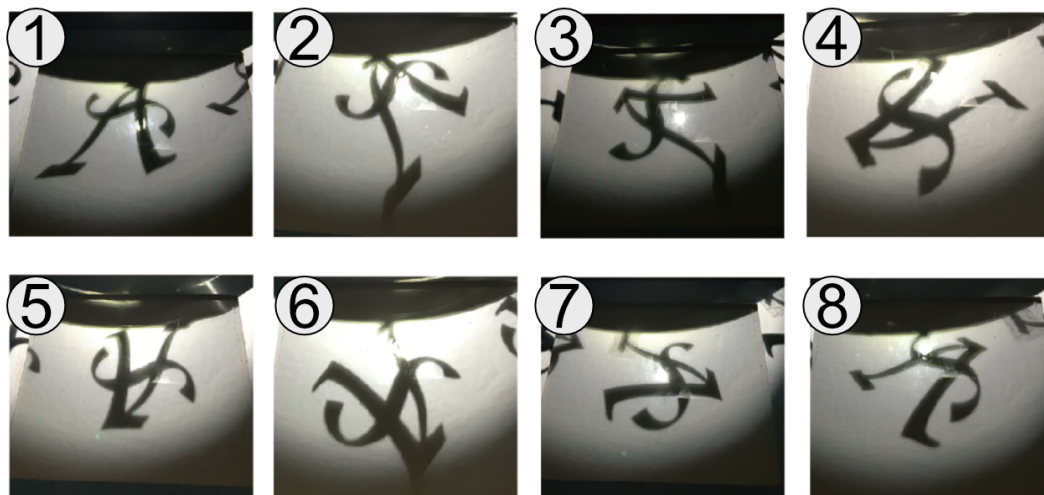


図 7.8: Animated KUI の影アニメーション

7.3 KUI Based Puppet について

本節では，KUI の応用表現手法として，影アニメーションを生成する人形型物体の影を直接操作し，影アニメーションの編集・再生を可能にする「KUI Based Puppet」を提案する．図 7.9 に示す KUI Based Puppet は，スクリーンに投影される人形型の実影に対し，腕や足の影を操作して影アニメーションを作成可能にする．また，操作によって作成された人形型物体の影アニメーションを保存し，再生する事が可能である．これにより，人形影絵のアニメーションを直感的に操作し編集可能にするだけでなく，人形影絵のデジタルアーカイビングにも応用する事ができると考える．

7.3.1 KUI Based Puppet のシステム構成

KUI Based Puppet は，人形型物体の影を操作し，影アニメーションを編集・再生を可能にする．通常の人形影絵は，演者が人形の四肢を操作し，動きを作り人形に光を当てる事で影アニメーションを作成する．本作品では，図 7.10a の様に人形型物体の四肢にアクチュエータを接続し，Arduino マイコンボードから四肢の動きを変更可能にする．これにより人形型物体の腕や足を影への操作に合わせて操作する事が可能になる．人形型物体の影を動かす操作には，ドラッグジェスチャを用いて，肩や足の関節(付け根)を軸に手足の角度を変えるように操作する．影へのタッチ検出とジェスチャ判定には，6 章 KUI Based Modeling のタッチ検出に用いたタッチパネルモジュール(図 7.10b)を使用する．タッチパネルモジュールを用いる事で，投影面となるスクリーンへの 10 点までのマルチタッチ検出が可能となり，



図 7.9: KUI Based Puppet のシステム

人形型物体の四肢を同時に操作する事もできるため、KUI Based Puppet のタッチ検出へ採用する。図 7.10c の投影面となるスクリーンと光源、人形型物体の位置関係は図 7.11 の様に、スクリーン背面に人形型物体を配置しその後ろに光源となるスタンドライトを配置する。影を投影するスクリーンは、乳白色のアクリルパネルを用いる事で、背面から投影される影も鑑賞者側の前面に映し出す事ができる。

人形型物体のサーボモータを制御する Arduino と、影へのタッチ検出を行うタッチパネルモジュールは、1 台のメイン PC に接続し制御する。制御用のアプリケーションを Processing(Java) で作成し、TUIO 通信によりタッチパネルモジュールから指のタッチ座標を取得する。影のタッチ検出は、予め人形型物体の四肢の位置とサイズを計測し、プログラム内で同形状の判定領域を設定する。タッチパネルモジュールで取得した座標が影の判定領域内であれば、影へのタッチと判定し、指座標の移動距離に応じて、タッチされている四肢の角度を計算する。そして、Arduino へ Serial 通信でサーボモータの角度制御の信号を送信する事で、人形型物体の四肢を動作させ影の位置を変更する。

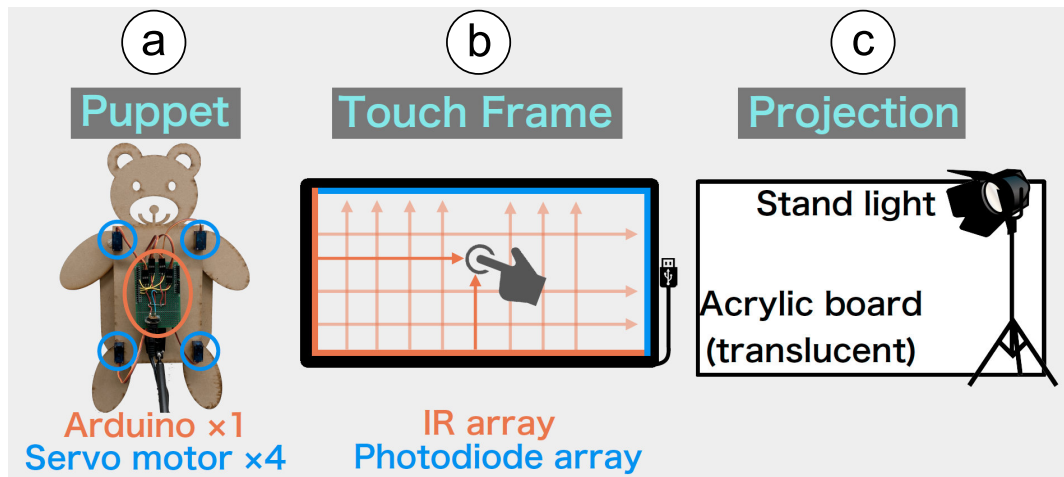


図 7.10: KUI Based Puppet のシステム構成要素

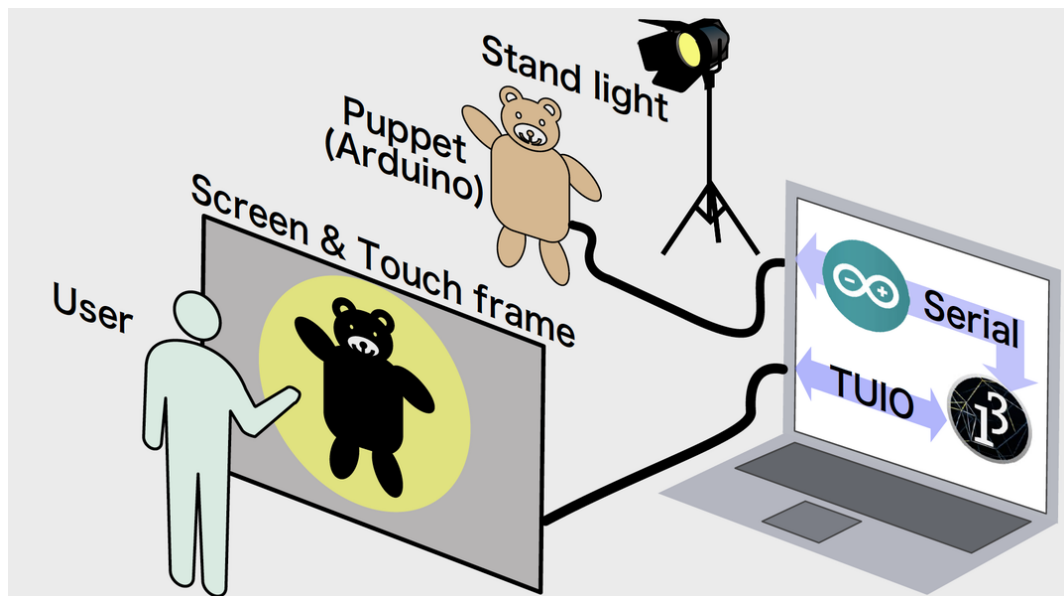


図 7.11: KUI Based Puppet のシステム概要

7.3.2 KUI Based Puppet のインタラクションと映像表現

KUI Based Puppet では、人形型物体の影に対するドラッグジェスチャ操作により、影絵を直接編集するインタラクションを可能にする。また、編集した影絵の動き (影アニメーション) を保存し、再生可能にする事で鑑賞者となるユーザ自身が影アニメーションを操作する事ができる。次に、影アニメーションの編集・保存・再生は、図 7.12 に示す様に、メイン PC 内の制御用アプリケーションで処理を行う。影アニメーションの保存処理は、図 7.12b の様

に，編集時に算出される人形型物体の四肢に取り付けたサーボモータの角度を CSV ファイルに保存する事で，四肢の動きつまりは影のアニメーションを保存する事ができる．そして影アニメーションの再生処理は，図 7.12c の様に，CSV ファイルに保存されたサーボモータの角度データを再度人形型物体の Arduino へ送信することで，保存した影アニメーションを再生する事が可能となる．再生処理は，編集操作を一定時間停止する事で自動で保存・再生が行われる．

これらの操作とインタラクションによって，従来の人形影絵の操作とは異なり，人形型物体を操作せずに影を直接操作する事で，影アニメーションの作成と保存が可能になる．また，人形型物体の動きを保存しているため，一度の操作で何度でも同じ影アニメーションを再生，鑑賞する事が可能になる．

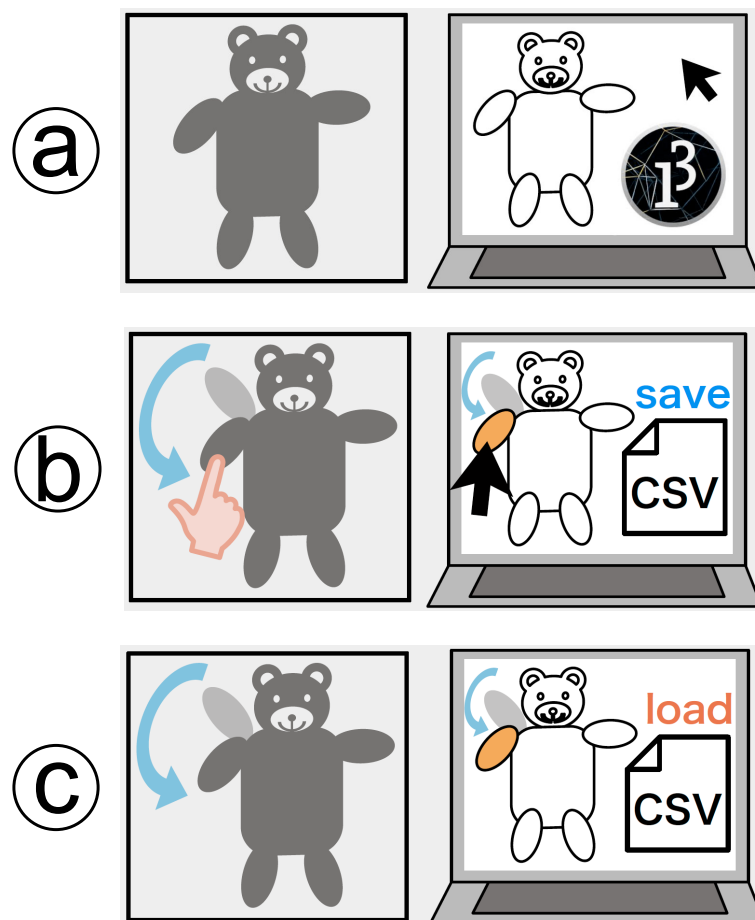


図 7.12: KUI Based Puppet のインタラクション

7.4 芸術表現についての考察

Animated KUI では、KUI の応用表現手法として、影アニメーションを直接操作しアニメーション再生操作を可能にするインタラクション手法を提案し、実装方法を示した。Animated KUI は、ゾートロープの様に回転する物体に光を当てる事で影のアニメーションを生成し、影アニメーションに対するジェスチャ操作によって、影アニメーションの再生・停止・逆再生の操作を可能にした。本研究では、影アニメーションが再生しているか、逆再生しているか判断しやすい様に、ロゴが回転するアニメーションを選定したが、物体を変更する事で、人の歩行アニメーションやストーリー性の有るアニメーションなど、影アニメーションのコンテンツを自由に変更可能である。また、横田らが提案する偏光板を用いて 2 種類のアニメーションを切り替え可能なゾートロープ [90] の様に、Animated KUI に偏光板を用いる事で影アニメーションのコンテンツを即時に変更することも可能になる。

KUI Based Puppet では、影アニメーションを生成する人形型物体の影を直接操作し、影アニメーションを直接編集、再生を可能にするインタラクション手法を提案し、実装方法を示した。KUI Based Puppet は、人形型物体の実影を直接操作し、影アニメーションの動きを直感的に作成可能にし、操作によって作成した影アニメーションの保存・再生も可能にした。また、直感的に影アニメーションを作成可能になるだけでなく、一度の操作で何度でも同じ影アニメーションを再生、鑑賞する事が可能になる。本研究では、複数のサーボモータを用いる事で、人形型物体の四肢を操作可能にしたが、3 章で提案した、複数ジェスチャによる物体の三次元移動システムと組み合わせる事で、人形型物体の影の移動や、影の大きさも変化させる事が可能である。それにより、より動きのある影アニメーションの作成と保存、再生が可能になる事で、伝統芸能であるワヤン・クリなどの影アニメーションをデジタルアーカイブする事も可能であると考ええる。

7.5 本章のまとめ

本章では、影を用いた実世界指向インタフェースとして提案した KUI の影の芸術表現への応用表現手法として、Animated KUI と KUI Based Puppet の二つの応用表現手法を提案した。Animated KUI において、影アニメーションの再生・停止・逆再生操作を可能にするインタラクション手法を提案し、その実装方法を示した事で、影アニメーションの新しい操作手法を提案する事ができた。また、KUI Based Puppet では、影アニメーションを生成する人形型物体の影を直接操作し、影アニメーションを直接編集、再生を可能にするインタラクション手法を提案し、その実装方法を示した事で、人形型物体の新しい操作方法や影アニ

メーションの保存再生手法を提案する事ができた。これにより、KUI を応用した Animated KUI と KUI Based Puppet は、影の芸術表現において有効性があることを示した。これらの点から、本研究で提案する Animated KUI と KUI Based Puppet は、KUI を用いた応用表現手法として、芸術分野での応用が可能であり、実影による影アニメーションを操作するインタフェースとして有効であると言える。

第8章 考察

本研究では、影を用いた実世界指向インタフェースとして、影ユーザーインタフェース(KUI)を提案し、KUIにおける物体とのインタラクションを実現する基礎システムを実装し、評価を行った。また、KUIの基礎システムを応用した三つの応用手法として、①影のメディアとしての性質を拡張するインタラクティブメディア、②3Dモデリングとデジタルファブリケーション、③影の芸術表現を提案した。本章では、それら提案手法についてKUIの基礎システムと、KUIの応用手法に分けて考察を行い、今後の展望を述べる。

8.1 KUI基礎システムについての課題と考察

8.1.1 KUIのインタフェース概念について

KUIのインタフェース概念は、実世界において物体が光を遮ることで影が発生するという従属関係を逆説的に捉え、影を操作することにより物体が変化するという新たな関係性を作り出しUIとして利用する。

KUIの基礎システムでは、KUIのインタフェース概念を実現するために、影への操作から連想される物体の動作を表現したインタラクション手法をタッチパネルのジェスチャーUIに基づき提案した。また本稿では、ピンチジェスチャによる物体の垂直移動システム、タッチジェスチャによる物体の移動停止システム、ドラッグジェスチャによる物体の水平移動システムを実装し、評価実験としてインタフェースの新規性、概念理解、操作性についてユーザ評価を行った。この評価実験は、ピンチジェスチャによる物体の垂直移動システム、タッチジェスチャによる物体の移動停止システムを対象に行った結果、殆どの被験者から、「影から物体に影響を与える概念を理解できた」と回答を得る事ができた。この事から、KUIの影と物体の関係性を逆説的に捉えるインタフェース概念は、システムを初めて操作するユーザでも理解する事ができる事が示された。しかし、操作性に対するユーザ評価は、数名の被験者が「思い通りに操作出来なかった」と回答している事から、システムの操作性を改善する必要があると考える。

8.1.2 システムの改善について

ユーザ評価の結果からシステムの操作性の改善が課題として挙げられた。KUIにおけるシステムの操作性は、主に物体の移動機構と影のタッチ検出が影響していると考えられる。物体の移動機構については、機構の動力部であるアクチュエータ精度が操作性に大きく関係する。そのため、アクチュエータには高トルクなモータを採用するか、制御角度の細かなステッピングモータを採用する事で、操作精度の向上を図る事ができると考える。また、移動機構の制御方法にPID(Proportional Integral Differential) 制御を用いることで、モータの安定した加減速を可能にし、よりスムーズな物体の移動が可能になると考える。

また、影のタッチ検出は、本稿ではFTIR タッチパネルとタッチパネルモジュールを用いてシステムの実装を行った。評価実験に用いたタッチ検出はFTIR タッチパネル方式である。FTIR タッチパネルは、赤外線カメラを用いたタッチパネル方式であるため、カメラ映像から指のタッチを検出するために画像処理が必要になる。カメラ性能や環境光の影響を受けやすい点から、タッチ検出の方式を変更する事で、タッチ検出の精度も向上すると考えられる。

そこで本稿では、6章の3Dモデリングとデジタルファブリケーションへの応用手法では、タッチパネルモジュールを採用し影のタッチ検出を行った。タッチパネルモジュールはモジュール側のマイコンでタッチ位置を計算し、TUIO通信でタッチ位置の座標を取得する事が可能である。また、スマートフォンなどのタッチパネルに用いられる静電容量方式のタッチパネルも検討し、操作精度の高いタッチパネル方式をKUIのタッチ検出に採用する事で、KUIの操作性を向上できると考える。

8.1.3 物体と光源の位置関係について

本稿で提案したKUIの基礎システムは、インタフェースとなる影の操作範囲を一定に保つため、光源と物体の位置関係も一定に保つように設計した。これにより、影を操作し物体を移動させる際も、影の操作面の変化が一定であるため、操作が容易であった。

KUIのインタラクションは、影を操作する事でその影を持つ物体の位置を変更する事が可能であるが、実世界で影の形状が変化する現象として、光源が移動する場合も想定できる。光源が移動する事で、影の位置や形状も変化するが、影の伸び縮みによる表現や、光源・物体・影の位置関係による情報提示も可能になると考える。また、光源を複数用いる事で影の陰影を表現でき、光源にカラーフィルムを貼る方法やマルチプロジェクションにより影への着色も可能になる。これにより影の情報量を増加させる事が可能になると考える。

この様に、光源位置や光源の数を変更しKUIのシステムに取り入れる事で、新しい影の

表現や、情報提示手法としての応用が可能になると考える。

8.1.4 複数ジェスチャの統合について

KUI の基礎システムでは、複数ジェスチャを組み合わせる事による物体の 3 次元移動インタラクションを提案した。このインタラクション手法では、ピンチジェスチャとドラッグジェスチャを用いる事で、物体の 3 次元移動インタラクションを可能にした。また、メディアとして影を拡張するインタラクティブメディアや 3D モデリングとデジタルファブリケーションの応用手法では、物体の 3 次元移動インタラクションを応用することでシステムを実装した。3D モデリングでは、ピンチジェスチャとドラッグジェスチャに加え、ピンチジェスチャとドラッグジェスチャの同時操作を実装し、垂直斜め方向への物体移動を可能にした。この他に、影を回転させるローテートジェスチャを追加する事で、物体の角度変化や、制作した 3D モデルの回転操作なども可能になる。この様に、本研究で提案した KUI のシステムに追加のジェスチャ操作を実装する事で、より高度な物体の操作が可能になり、様々なインタラクションへ応用可能になると考える。しかし、操作の種類が増える事で、操作の複雑性も増してしまうため、インタラクションの目的に適した操作数を選定する必要もある。

8.2 KUI の応用手法についての課題と考察

8.2.1 影のメディアとしての性質を拡張するインタラクティブメディアについて

KUI を応用し、影のメディアとしての性質を拡張するインタラクティブメディアとして Augmented Shadow Media を提案し、その実装方法と評価実験の結果について述べた。

評価実験では、実影による時間軸を有する情報 (アニメーション) の編集・保存・再生に関して評価を行った。本稿の提案手法は、影絵の編集・保存・再生を対象としていることから、空間的再現性の評価は目視により行い、編集と出力に大きな差が見られない結果となった。また、物体の速度は内部処理により減速され、素早い操作に対しては、追従速度が十分ではない結果となった。今後の課題として、システムの精度向上が課題として挙げられるが、KUI の基礎システムと同様に、アクチュエータの選定とタッチパネル方式の選定により、システムの精度向上は解決できると考える。また、再生時の時間的再現性は直線運動、円運動共に、操作時と再生時の時間差が 0.1 秒以下と再現性が高いことが示された。この結果から、Augmented Shadow Media により、影の直線・曲線移動、拡大縮小といった影絵の基礎的な動作について、編集・再生・保存が可能になったと言える。

本システムは、上部の光源から下方向に光を照射し、投影面となるタッチパネルに影を投影するが、光源と実体の位置を変更するか、鏡で投影される方向を正面に変更する事で、壁面やスクリーンへの影のプロジェクションも可能である。これにより、大人数での影の鑑賞が可能になり、従来の影のメディアの様に大衆演劇の投影装置として応用できると考えられる。また、本研究では、メディアとしての影の編集・保存・再生について拡張を行ったが、Augmented Shadow Media のシステムを遠隔に 2 台用意し、テレプレゼンスシステムに応用する事で、遠隔での影を介したコミュニケーションが実現可能になると考える。これにより、影のメディアとしての性質を空間的制約を超えて拡張する事が可能になる。

8.2.2 3D モデリングとデジタルファブリケーションについて

KUI を応用した 3D モデリングとデジタルファブリケーションの手法として KUI Based Modeling と FabKUI を提案した。KUI Based Modeling は、KUI を用いて物体を移動させ、その物体の移動した軌跡によって 3D ペンのようなモデリングを可能にし、実空間のオブジェクトを移動させモデリングを行うことで生成モデルの空間的スケール認識が容易になり、カメラ視点の操作やコマンドキーの入力が不要となる。本研究では、KUI のインタフェース特性である、影への操作で物体の 3 次元移動が可能になるインタラクションを用いる事で、実空間上での 3D モデリングを可能にした。モデリングの操作には、ドラッグジェスチャとピンチジェスチャを組み合わせ、4 種類の操作を実装した。これにより 3D ペンを操作しスケッチする様に、実空間上に物体の軌跡を描く事で、3D モデルの形状を作成する事が可能になった。本システムでは、シンプルな操作で 3D モデリングを可能にするため、3D モデリングに必要な最小限の操作を提供したが、ユーザが操作に慣れてきた際に、より細かな形状を作成できる機能を実装することで、熟練度に合わせた操作手法とモデリング体験を提供する事ができると考える。例として、削除機能や消しゴム機能など、3D モデルを修正する機能や、操作時に生成されるプリミティブオブジェクトのサイズや形状、色などの設定を変更できる機能が挙げられる。これらの追加要素には、影へのジェスチャ操作を割り当てる事もできるが、実空間を移動する物体を取り替え可能にする事で、3D ペンのペン先や素材を変更する様に、取り付けた物体の色や形状、大きさを反映させたプリミティブオブジェクトで、3D モデルを作成可能になると考える。これにより、実空間において、アナログ的かつ配色的な 3D モデリングが可能になると考える。

FabKUI では、KUI Based Modeling を発展させ、ファブリケーションスペースなどのパブリックなものづくり空間において、スマートフォン AR を用いて複数人で 3D モデルを観察可能にした。また、FabKUI の特徴である、影と物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。その結果、三本指でのドラッグジェスチャは難易度が高い事がわかり、改めて操作
方法を選定する必要がある事がわかった。また、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ことを示した
が、AR マーカが柱や手で隠れると、3D モデルの表示も消えてしまうため、AR の認識精度
を向上する必要がある。改善方法として、AR マーカを複数枚四角に配置しマーカ検出の精
度を上げる方法や、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、小型ドローンを物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。これにより、FabKUI の実空間を共有するモデリング
手法において、複数人で同時に 3D モデリングを行う事が可能になると考える。

また、制作中の 3D モデルの表示にスマートフォン AR を用いた事で、スマートフォン AR
をモデリングの補助インタフェースに用いる事ができると考える。例えば、3D モデルの修
正や削除機能、プリミティブオブジェクトの色やサイズの変更などの補助機能をスマート
フォンの画面で操作できると考える。また、AR グラスを用いる事で両手操作が可能になり、
片手で影への操作、もう一方の手で補助機能の操作を行う事ができると考える。この様に、
物体を物理的に変更することで、操作性を向上するアナログ的な発展性と、スマートフォン
をインタフェースとして活用するデジタル的に発展させる事が考えられる。これは本提案手
法が有する高い汎用性を示している。

8.2.3 影の芸術表現について

KUI の影の芸術表現への応用手法として、Animated KUI と KUI Based Modeling を提
案した。Animated KUI は、影アニメーションを直接操作しアニメーションの再生・停止・
逆再生操作を可能にした。Animated KUI は、ゾードロープの様に回転する物体に光を当て
る事で影のアニメーションを生成可能である。本研究では、影アニメーションが再生してい
るか、逆再生しているか判断しやすい様に、ロゴが回転するアニメーションを選定したが、
物体を変更する事で、人の歩行アニメーションやストーリー性の有るアニメーションなど、
影アニメーションのコンテンツを自由に変更可能である。また、アクチュエータには回転速
度を高めるため DC モータを用いた事で、ストロボライトの点滅スピードに合わせ、アナロ
グボリュームで回転速度を調整した。今後、アクチュエータにステッピングモータとギアを

用いる事で、ストロボライトの点滅スピードに合わせ、ステッピングモータの回転速度を高速かつ一定の回転速度をプログラムから設定する事ができる。これにより、停止時のモータのオーバーランを軽減し、即時に次の動作へ移行する事ができる。

KUI Based Puppet では、影アニメーションを生成する人形型物体の影を直接操作し、影アニメーションを直接編集、再生を可能にするインタラクション手法を提案し、実装方法を示した。KUI Based Puppet は、人形型物体の実影を直接操作し、影アニメーションの動きを直感的に作成可能であり、操作によって作成した影アニメーションを保存し、再生する事も可能である。本研究では、複数のサーボモータを用いる事で、人形型物体の四肢を操作可能にしたが、3章で提案した、複数ジェスチャによる物体の三次元移動システムと組み合わせる事で、人形型物体の影の移動や、投影面からの距離を操作する事で影の大きさも変化させる事が可能である。また、本研究で用いた人形型物体は四肢の関節可動は1箇所だけであった。そこで、人形型物体の関節部を増設する事で、より従来の人形影絵の表現に近い動きを再現可能になると共に、その影アニメーションの保存と再生も可能になる。関節の制御には、各関節にサーボモータを取り付け逆運動学を用いた制御方法で動作を制御することが可能である。

8.3 今後の展望

8.3.1 物体の形状変形について

本稿では、KUI のインタフェース概念を実現するため、KUI の基礎システムで物体の位置や動作を変更するインタラクション手法を実装した。例として、ピンチジェスチャによる物体の垂直移動システムでは、影に対して大きくする操作(ピンチアウト)をする事で、物体を垂直上方向へ移動させる(光源へ接近させる)事ができる。しかし、物体の影が大きくなる現象は、物体が光源へ接近する際と、物体そのものの大きさが変化した際の2つの状況が想定され、本稿では、物体が光源へ接近する事象を選定した。そこで、今後の展望として、影を拡大縮小させるピンチジェスチャによって物体の大きさを变化させるインタラクション手法を提案する。このインタラクション手法を3Dモデリングに応用する事で、実際に作成される3Dオブジェクトの大きさを実世界の物体の大きさで確認しモデリングを行う事が可能になる。

8.3.2 影のカービングと回転物体の形状変形について

彫刻には、いくつかの制作手法があり、その中の一つにカービングという制作方法がある。カービングは、原型となる素材を削り出し、形を成形していく手法である。このカービングを KUI の応用手法として提案する事で、影を削る様な操作で 3D オブジェクトの形状を変形させる事ができると考える。しかし、影は物体の 2 次元形状をトレースするため、カービングを行うには物体の側面しか削る事が出来ない。そこで、物体をろくろや旋盤の様に回転させ、その影を指でカービングする事で 3D 形状を作成する手法を提案できると考える。この操作は、3DCAD ソフトでも平面図形を回転させ、3D 形状を作成する機能として実装されている。また、株式会社メルタは、ハンドトラッキングデバイスを用いたバーチャルろくろシステム [91] を開発し、仮想空間内でろくろの制作手法で 3D 形状を作成可能にしている。これにより、実世界の影を変形させることで、回転物体の 3D 形状を作成する事ができる。

8.3.3 複数物体の同時制御について

本研究で提案した KUI の基礎システムや応用手法では、物体を移動機構に取り付け、機構を制御することで物体の動きや位置を変更可能にした。しかし、移動機構の制限から動作を制御できる物体は一つだけであった。そこで、今後の展望として、動作を制御する物体に移動機構を組み込み、自立移動ロボットのように単独で移動可能な物体を複数制作する。それにより、単独移動可能な物体の影に対して、ドラッグジェスチャを行う事で、影を引っ張るように物体を移動させる事が可能になる。移動機構には、Sony の toio[92] などの小型の 2 輪ロボットを用いる事で実装可能であると考ええる。

第9章 結論

本稿では、影を用いた実世界指向インタフェースとして、影ユーザインタフェース (KUI) の基礎システムを提案し、KUI を応用する三つの手法を提案した。第2章で、本研究の関連研究について述べ、第3章で、KUI の基礎システムのインタラクション手法を提案し、第4章で、KUI の基礎システムを評価した。KUI の応用手法として、第5章では、影のメディアとしての性質を拡張する Augmented Shadow Media を提案し、第6章では、3D モデリングとデジタルファブリケーションについて述べ、KUI Based Modeling と FabKUI を提案した。第7章では、影の映像表現について述べ、KUI の応用手法として、Animated KUI と KUI Based Puppet を提案した。第8章で、本稿の考察を行い、課題と今後の展望を示した。

以下に本稿における研究成果を述べる。

(1) 影を用いた実世界指向インタフェースにおける基礎システムの提案

- 第3章において、影を用いた実世界指向インタフェースの概念として、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影ユーザーインタフェース (KUI) を提案した。
- KUI を実現する基礎システムとして、ピンチジェスチャによる物体の垂直移動システム、タッチジェスチャによる物体の移動停止システム、ドラッグジェスチャによる物体の水平移動システムを提案した。
- KUI の基礎システムを統合した、複数ジェスチャによる物体の3次元移動システムを提案し、影に対する操作で物体の三次元移動インタラクションを可能にした。
- 第3章で提案した、KUI の基礎システムを評価するため、第4章で評価実験を行った。その結果、「影から物体に影響を与えるインタフェース概念」「影から物体を操作するインタラクション手法」に新規性を有する事が示された。

(2) 影のメディアとしての性質を拡張するインタラクティブメディアの提案

- 第5章において、KUI を応用し、メディアとしての影の情報を変更する事なく保存・再生可能にする Augmented Shadow Media を提案した。
- Augmented Shadow Media のインタラクション手法と実装方法を示し、影の時間的再現性を評価した。その結果、時間的再現性は高く、影のメディア保存にお

いて有効性を示した。

- 第5章において、Augmented Shadow Media を提案し、評価実験により影のメディア保存において有効性を示した事により、影のメディアとしての性質を拡張する事が可能となった。

(3) KUI を応用した 3D モデリング手法とデジタルファブリケーション手法の提案

- 第6章において、KUI を応用し、物体の3次元移動によって生成される軌跡により 3D モデリングを可能にする手法として、KUI Based Modeling を提案した。
- また、KUI Based Modeling を発展させ、ファブリケーションスペースなどのパブリックなものづくり空間において、スマートフォン AR を用いて複数人で 3D モデルを観察可能にする FabKUI を提案した。
- FabKUI に対して共同作業性を評価した結果、「KUI に基づくドローイングの様な操作」「360 度フリーアクセス可能なインタフェース設計」「AR による視認性」における点で有効性が示された。

(4) KUI を応用した影の芸術表現作品の提案

- 第7章において、KUI の応用表現手法として、影アニメーションを直接操作しアニメーションの再生操作を可能にする Animated KUI を提案した。
- Animated KUI を提案し、実装方法を示した事により、影アニメーションに対するインタラクティブな再生・停止・逆再生が可能になった。
- また、人形型物体の影を直接操作し、影アニメーションの編集・保存・再生を可能にする KUI Based Modeling を提案した。
- KUI Based Modeling を提案し、その実装方法を示した事で、影を操作し影アニメーションを作成可能になるだけでなく、一度の操作で繰り返し影アニメーションを鑑賞する事が可能になった。
- 第7章において、KUI の応用表現手法として Animated KUI と KUI Based Modeling を提案し、影アニメーションの編集・保存・再生を可能にするインタラククションを実装した事で、KUI を応用した Animated KUI と KUI Based Puppet は、影の芸術表現において有効性が示された。

本研究では、上記の様に影を用いた実世界指向インタフェースとして、影ユーザインタフェース (KUI) の基礎システムを提案し、影のメディアとしての性質を拡張するインタラクティブメディア、KUI を応用した 3D モデリング手法とデジタルファブリケーション手法、影の芸術表現作品について KUI の応用例を示した。また、第8章の今後の展望で述べた発展案を実装することで、実世界において、影から物体の形状を変更可能にするインタラクシ

ンや、物体の形状変形を用いたモデリング手法、複数物体の同時制御が可能となる。これにより、影から物体に影響を与える KUI のインタフェース概念をより進化させる事でインタラクション分野の発展に貢献ができると考える。

参考文献

- [1] Zhengyou Zhang. Microsoft kinect sensor and its effect. *IEEE MultiMedia*, Vol. 19, No. 2, p. 4–10, 2012.
- [2] Ultraleap. Leap motion, 2012. <https://www.ultraleap.com/> (参照 2022-12-01).
- [3] Tobii Pro AB. Tobii pro lab, 2008. <https://www.tobiipro.com/> (参照 2022-12-01).
- [4] Hiroshi Ishii and Brygg Ullmer. Tangible bits: Towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, p. 234–241. Association for Computing Machinery, 1997.
- [5] 暦本純一. 実世界指向インタフェースの研究動向. コンピュータ ソフトウェア, Vol. 13, No. 3, pp. 3_196–3_210, 1996.
- [6] 栗原渉, 中野亜希人, 串山久美子, 羽田久一. Botanical puppet:電気刺激によるオジギソウの制御. 芸術科学会論文誌, Vol. 16, No. 4, pp. 110–117, 11 2017.
- [7] Satoshi Kuribayashi, Yusuke Sakamoto, and Hiroya Tanaka. I/o plant: A tool kit for designing augmented human-plant interactions. In *CHI '07 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2537—2542. Association for Computing Machinery, 2007.
- [8] Yuriko Suzuki and Minoru Kobayashi. Arrayed air jet based haptic display: Implementing an untethered interface. In *Adjunct Proceedings of the 16th annual ACM Symposium on User Interface Software and*, pp. 1–2, 2003.
- [9] 道弘池田, 正人平川. 水を用いたマルチディップインタフェース. 情報処理学会論文誌, Vol. 51, No. 11, pp. 2103–2111, 2010.
- [10] plaplaz ltd. Imaginature, 2013. <https://plaplax.com/works/218/> (参照 2022-12-01).

- [11] RANDOM INTERNATIONAL. Rain room, 2012. <https://www.random-international.com/rain-room-2012> (参照 2022-11-01).
- [12] Charles Sowers. Windswept, 2011. <https://www.charlessowers.com/new-page-1> (参照 2022-12-01).
- [13] 串山久美子, 笹田晋司. 硬軟感覚を提示できるアクティブ砂場「magnet sand play」の開発. インタラクション, Vol. 2009, pp. 51–52, 2009.
- [14] 雄輝. 影の特性を利用した実世界指向型インタフェースのデザイン研究. 法政大学大学院紀要 デザイン工学研究科編, Vol. 5, pp. 1–8, 2016.
- [15] 武内真梨奈, 五十川麻理子, 岩井大輔, 佐藤宏介. 影のメタファを利用したポインティングインタフェースにおける影の制約緩和による操作性の向上. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 2, pp. 207–214, 2014.
- [16] MOON Joon Yong. Augmented shadow, 2010. <https://joonmoon.net/Augmented-Shadow> (参照 2022-12-01).
- [17] MOON Joon Yong. Augmented shadow – inside, 2021. <https://joonmoon.net/Augmented-Shadow-Inside> (参照 2022-12-01).
- [18] 坪倉輝明. Shadow touch, 2010. http://teruaki-tsubokura.com/works.php?ar_id=1 (参照 2022-12-01).
- [19] Hiroshi Ishii, Ali Mazalek, and Jay Lee. Bottles as a minimal interface to access digital information. In *CHI '01 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, p. 187–188. Association for Computing Machinery, 2001.
- [20] Sergi Jordà, Gunter Geiger, Marcos Alonso, and Martin Kaltenbrunner. The re-actable: Exploring the synergy between live music performance and tabletop tangible interfaces. pp. 139–146, 2007.
- [21] Jun Rekimoto. Smartskin: An infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, p. 113–120. Association for Computing Machinery, 2002.
- [22] Apple. Siri, 2016. <https://www.apple.com/jp/siri/> (参照 2022-12-01).

- [23] Jamie Zigelbaum, Alan Browning, Daniel Leithinger, Olivier Bau, and Hiroshi Ishii. G-stalt: A chirocentric, spatiotemporal, and telekinetic gestural interface. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, p. 261–264. Association for Computing Machinery, 2010.
- [24] Alex Guevara. Corteza, 2017. <https://cargocollective.com/alexguevara/CORTEZA> (参照 2022-12-01).
- [25] g.tec neurotechnology. Unicorn hybrid black, 2017. unicorn-bi.com/ja/ (参照 2022-12-01).
- [26] ドミニク チェン Google Creative Lab. ファウンド・イン・トランスレーション, 2021. <https://www.2121designsight.jp/program/translations/index.html> (参照 2022-12-01).
- [27] Takaki Kimura and Yasuaki Kakehi. Moss-xels: Slow changing pixels using the shape of *racomitrium canescens*. In *ACM SIGGRAPH 2014 Posters*. Association for Computing Machinery, 2014.
- [28] Harpreet Sareen, Jiefu Zheng, and Pattie Maes. Cyborg botany: Augmented plants as sensors, displays and actuators. In *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, p. 1–2. Association for Computing Machinery, 2019.
- [29] Craig Wisneski, Hiroshi Ishii, Andrew Dahley, Matt Gorbett, Scott Brave, Brygg Ullmer, and Paul Yarin. Ambient displays: Turning architectural space into an interface between people and digital information. In *International Workshop on Cooperative Buildings*, pp. 22–32. Springer, 1998.
- [30] 武内真梨奈, 五十川麻理子, 岩井大輔, 佐藤宏介. 影のメタファを利用したポインティングインタフェースにおける影の制約緩和による操作性の向上. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 2, pp. 207–214, 2014.
- [31] 宮崎雄輝, 土屋雅人. 影を用いた指差し操作によるデジタルサイネージのデザイン研究. 日本デザイン学会研究発表大会概要集, Vol. 61, p. 47, 2014.
- [32] 宮崎雄輝, 土屋雅人. 影の特性を利用した実世界指向型インタフェースのデザイン研究. 日本デザイン学会研究発表大会概要集, Vol. 62, p. 41, 2015.

- [33] Niloy J. Mitra and Mark Pauly. Shadow art. In *ACM SIGGRAPH Asia 2009 Papers*. Association for Computing Machinery, 2009.
- [34] 村上葉, 土橋宜典ほか. 浮遊物体を用いたインタラクティブなシャドウアート生成システム. 研究報告コンピュータグラフィックスとビジュアル情報学 (CG), Vol. 2019, No. 7, pp. 1–5, 2019.
- [35] Frederik Anrys, Philip Dutré, and Yves D. Willems. Image-based lighting design. In *Proceedings of the 4th IASTED International Conference on Visualization, Imaging, and Image Processing*, p. 15, 2004.
- [36] Seung-tak Noh, Sunao Hashimoto, Daiki Yamanaka, Yoichi Kamiyama, Masahiko Inami, and Takeo Igarashi. Lighty: A painting interface for room illumination by robotic light array. In *2012 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 305–306, 2012.
- [37] Fabio Pellacini, Parag Tole, and Donald P. Greenberg. A user interface for interactive cinematic shadow design. *SIGGRAPH '02*, pp. 563–566, 2002.
- [38] Yugo Minomo, Yasuaki Kakehi, and Makoto Iida. Transforming your shadow into colorful visual media: multi-projection of complementary colors. In *Proceedings of the 2005 ACM SIGCHI International Conference on Advances in computer entertainment technology*, pp. 61–68, 2005.
- [39] Yoshiyuki Miwa, Atsushi Nishide, Naruhiro Hayashi, Shiroh Itai, and Hiroko Nishi. Co-creative bodily expression through remote shadow media system. In *International Conference on Human Interface and the Management of Information*, pp. 445–454. Springer, 2014.
- [40] Hiroko Iwasaki, Momoko Kondo, Rei Ito, Saya Sugiura, Yuka Oba, and Shinji Mizuno. Interaction with virtual shadow through real shadow using two projectors. In *ACM SIGGRAPH 2016 Posters*. Association for Computing Machinery, 2016.
- [41] Mariko Isogawa, Daisuke Iwai, and Kosuke Sato. Making graphical information visible in real shadows on interactive tabletops. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 20, No. 9, pp. 1293–1302, 2014.
- [42] Saki Sakaguchi, Hikari Tono, Takuma Tanaka, and Mitsunori Matsushita. Restive shadow: Animating invisible shadows for expanding shadowgraph experience. In

- SIGGRAPH Asia 2013 Emerging Technologies*. Association for Computing Machinery, 2013.
- [43] 雅三石山, 康明寛. 物体の本物の影に動きを与えるインタラクティブディスプレイの検討, 2016.
- [44] 岩崎妃呂子, 水野慎士. 影内部映像に対するインタラクションの提案. マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2016 論文集, Vol. 2016, pp. 1854–1858, 2016.
- [45] 田中翠, 中村鮎, 杉木聡恵ほか. ユング心理学の「影 (shadow)」について. 異文化 : journal of intercultural communication : ibunka, Vol. 14, pp. 231–232, apr 2013.
- [46] 田端健人ほか. ハイデガーのパイデア論: プラトン 「洞窟の比喩」 解釈から. 宮城教育大学紀要, Vol. 45, pp. 199–206, 2010.
- [47] 森田悟. アーデルベルト・フォン・シャミッソーの『ペーター・シュレミールの不思議な物語』について–「影」の放棄の意味. 研究紀要, No. 57, pp. 145–154, 1999.
- [48] Diet Wiegman. Shadow dancing, 2008. <https://dietwiegman.tumblr.com/light%20sculptures> (参照 2022-12-01).
- [49] 梅田英春. バリ島の影絵人形芝居ワヤンにおける人形の手の表現と役割. 電子情報通信学会技術研究報告. HIP, ヒューマン情報処理, Vol. 105, No. 358, pp. 13–18, 2005.
- [50] Massivart Laurent Craste, Dpt. Parade, 2014. <https://dpt.co/en/projects/parade/> (参照 2022-12-01).
- [51] 藤本直明. Immersive shadow. 魔法の美術館 光と影のイリュージョン, 2012. <https://sites.google.com/site/naokiring/> (参照 2022-12-01).
- [52] Apple. Gestures - User Interaction - iOS - Human Interface Guidelines. <https://developer.apple.com/design/human-interface-guidelines/ios/user-interaction/gestures> (参照 2022-12-01).
- [53] Jefferson Y. Han. Low-cost multi-touch sensing through frustrated total internal reflection. In *Proceedings of the 18th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, p. 115–118. Association for Computing Machinery, 2005.
- [54] Jakob Nielsen. *Usability engineering*. Morgan Kaufmann, 1994.

- [55] Sun Tawalwongsri. The creative choreography for nang yai (thai traditional shadow puppet theatre) ramakien, wat ban don, rayong province. *Fine Arts Journal*, Vol. 14, No. 2, 2012.
- [56] 中村滋延. 作曲作品の題材としてのラーマーヤナースバエク・トムの調査を踏まえて. 芸術工学研究, Vol. 7, pp. 31–41, 2007.
- [57] 劇団かかし座. Hand shadows animare” in spain 2016 digest, 2016. https://www.youtube.com/watch?time_continue=29&v=Dm2rWio8Td0 (参照 2022-12-01).
- [58] 影絵劇団カシの樹. <http://www.kashi-no-ki.co.jp/> (参照 2022-12-01).
- [59] 早乙女太一, teamLab. 龍と牡丹」－剣舞／影絵－, 2011. <https://www.teamlab.art/jp/w/2009/> (参照 2022-12-01).
- [60] クワクボリョウタ. 10 番目の感傷 (点・線・面). 第 14 回文化庁メディア芸術祭, 2010. http://archive.j-mediaarts.jp/festival/2010/art/works/14a_The_Tenth_Sentiment/.
- [61] Mariko Shitara, Jin Gong, Ryo Serizawa, Masato Makino, Akihiro Nishioka, and Hidemitsu Furukawa. Food creation with 3d gel printer for foods. *Transactions of the JSME (in Japanese)*, 2015.
- [62] Ayah Bdeir. Electronics as material: Littlebits. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, p. 397–400, New York, NY, USA, 2009. Association for Computing Machinery.
- [63] Robert C. Zeleznik, Kenneth P. Herndon, and John F. Hughes. Sketch: An interface for sketching 3d scenes. In *ACM SIGGRAPH 2006 Courses*, p. 9–es, New York, NY, USA, 2006. Association for Computing Machinery.
- [64] Google. Tilt brush, 2016.
- [65] Jeppe U. Walther, J. Andreas Bærentzen, and Henrik Aanæs. Tangible 3d modeling of coherent and themed structures. *Computers & Graphics*, pp. 53 – 65, 2016.
- [66] Andi Dine and George-Christopher Vosniakos. On the development of a robot-operated 3d-printer. *Procedia Manufacturing*, Vol. 17, pp. 6 – 13, 2018.

- [67] Haruki Takahashi and Jeeun Kim. 3d pen + 3d printer: Exploring the role of humans and fabrication machines in creative making. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, p. 1–12, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [68] Reas Casey and Fry Benjamin. Procesing, 2001. <https://processing.org/>(参照 2021-08-01).
- [69] Rendeever. Multibrush, 2021. <https://www.oculus.com/experiences{\slash}quest/3438333449611263/>(参照 2022-12-01).
- [70] NTT docomo. Virtual design atelier, 2017. <https://www.nttdocomo.co.jp/biz/service/vda/>(参照 2022-12-01).
- [71] Brinx Software. Masterpiecevr, 2017. <https://masterpiecestudio.com/>(参照 2022-12-01).
- [72] Kikuchi Kouta and Amaoka Toshitaka. Kage user interface : A study for shadow based physical object interaction using real shadow as an interface. *The Journal of the Society for Art and Science*, Vol. 16, pp. 130 – 137, 2017.
- [73] 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.
- [74] Patrick Reipschläger and Raimund Dachzelt. 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.
- [75] 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.
- [76] 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.
- [77] 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.
- [78] 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.
- [79] 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.
- [80] Yoshifumi Kitamura, Yuichi Itoh, and Fumio Kishino. Real-time 3d interaction with activecube. In *CHI '01 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, p. 355–356. Association for Computing Machinery, 2001.
- [81] 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.
- [82] 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.
- [83] Hiroshi Ishii. Illuminating clay: a tangible interface with potential grass applications. In *GRASS Users Conference*, 2002.
- [84] Kouta Kikuchi and Toshitaka Amaoka. Animated kui. In *2018 Nicograph International (NicoInt)*, pp. 88–88, 2018.

- [85] K. Kikuchi and T. Amaoka. Kui based puppet. In *2020 Nicograph International Poster Session*, pp. 95–95, 2020.
- [86] Koen Vermeir. The magic of the magic lantern (1660–1700): on analogical demonstration and the visualization of the invisible. *The British Journal for the History of Science*, Vol. 38, No. 2, pp. 127–159, 2005.
- [87] クワクポリ ヨウタ. Lost #16. 札幌国際芸術祭 2017 開催報告書, 2017. https://siaf.jp/2017/media/2018/03/01_exhbitions.pdf (参照 2022-12-01).
- [88] クワクポリ ヨウタ. エントロピア. 越後妻有「大地の芸術祭」2022, 2022. https://www.echigo-tsumari.jp/media/20220805_etatarekore7/ (参照 2022-12-01).
- [89] 真鍋大度, 石橋素. 16 Forms. Spiral, 2011. <http://www.daito.ws/en/work/16-forms.html#2> (参照 2022-12-01).
- [90] Tomohiro Yokota and Tomoko Hashida. Magic zoetrope: Representation of animation by multi-layer 3d zoetrope with a semitransparent mirror. In *SIGGRAPH Asia 2018 Emerging Technologies*. Association for Computing Machinery, 2018.
- [91] 株式会社メルタ一般社団法人 WAZAtoBA. <https://toio.io/>, 2017. <https://roqu.ro/> (参照 2022-12-01).
- [92] ソニー・インタラクティブエンタテインメント. toio, 2019. <https://roqu.ro/> (参照 2022-12-01).