

Title	AR技術を用いた折り紙の体験拡張システム
Author(s)	大依, 正宣
Citation	
Issue Date	2023-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/18255
Rights	
Description	Supervisor: 宮田 一乗, 先端科学技術研究科, 修士(知識科学)

修士論文

AR技術を用いた折り紙の体験拡張システム

大依 正宣

主指導教員 宮田 一乗

北陸先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科
(知識科学)

令和5年3月

Abstract

This thesis describes an interactive AR system for origami. We designed a tangible user interface that seamlessly connects the virtual environment and the physical world to augment the origami experience. Origami created by the user is augmented through the AR glasses, and the user can manipulate the superimposed virtual objects.

The goal of this research is to enhance the enjoyment of new origami experiences. To this end, we added digital information to origami created in the physical world and constructed an interactive interaction using augmented reality (AR) and 3D origami shape recognition.

To ensure stable superposition accuracy, we searched for the optimal method of embedding AR markers in origami paper and used highly random patterns as AR markers. By using multiple AR marker patterns embedded in origami paper, we were able to achieve multifaceted origami shape recognition. Recognition of multiple markers, the coordinates and angles of each marker, and recognition of the detailed shape of the origami paper enabled interaction with computer graphics through shape changes. The AR markers are placed all over the origami paper, and the user can change the pattern of the AR markers depending on how he or she folds the paper.

We conducted an evaluation experiment, and the results showed that the participants who experienced this system enjoyed it and were motivated to try origami. Compared to regular origami, 90% of participants said they would like to try origami again, indicating a significant increase in motivation for the experience. Participants were highly satisfied with the experience of being able to influence the outcome of the virtual reality through the act of folding origami in the real world, the manipulation of the CG according to their movements, and the CG design that changes depending on the folded artifact. The difficulty of the experience and the level of stress caused by the experience were not significantly different

from those of regular origami. Furthermore, it was shown that the design of natural AR markers that match the surrounding landscape can be used to construct a system that allows users to enjoy augmented reality through origami in a more natural way.

The advantages of the proposed method include the ability to experience AR using only simple tools, AR experiences that take advantage of the user's creativity, interaction with virtual information, and the high scalability of AR. It is suggested that the proposed method can be used for education, therapy, entertainment, marketing, etc.

目次

第1章	はじめに	1
第2章	関連研究	3
2.1	伝統的な遊びにデジタル技術を用いた体験拡張の研究	3
2.2	折り紙とデジタル技術を掛け合わせた研究	5
2.3	触覚デバイス及びタンジブルユーザインタフェースに関する研究	7
第3章	提案手法	11
3.1	システム概要	11
3.2	開発環境	13
3.3	システムフロー	14
3.4	折り紙への最適なマーカ組み込みの検証	15
3.5	複数 AR マーカを用いた3次元折り紙形状認識	16
3.6	ユーザの操作による CG の形状変化	23
3.7	ユーザの折り方による CG オブジェクトの変化	25
第4章	実験・評価	27
4.1	実験手順	27
4.2	アンケート項目の選定	29
4.3	アンケート調査の結果	30
4.3.1	体験の楽しさ	30
4.3.2	体験モチベーション	31
4.3.3	体験の難しさ	31
4.3.4	体験時のストレス	33

4.3.5	AR 折り紙のデザイン性	33
4.3.6	自由記述について	35
4.4	評価結果のまとめ	37
4.5	期待される応用例	38
第 5 章	まとめ・今後の課題	40
5.1	まとめ	40
5.2	制限	41
5.3	今後の課題	41
	謝辞	43
	参考文献	44
	付録	48
	実験に使用した折り紙作成手順書	48
	アンケート項目	52

目 次

2.1	TSUMIKI CASTLE: 積み木を用いたインタラクティブな VR システム	4
2.2	仮想と現実の相互作用を実現する AR 紙相撲対戦システム	4
2.3	Mixed Reality Storytelling Environments Based on Tangible User Interface: Take Origami as an Example	5
2.4	おりがみらいふ：折り紙のデジタルな演出の提案	6
2.5	PlayGAMI: Augmented Reality Origami Creativity Platform	7
2.6	HaptX Gloves G1	8
2.7	様々な AR コントローラ	9
2.8	Turning everyday objects into passive tangible controllers	10
3.1	体験イメージ	12
3.2	HoloLens2	14
3.3	システムフロー	14
3.4	システム構成図	15
3.5	予備実験での認識精度検証結果	17
3.6	AR マーカを組み込んだ折り紙	18
3.7	複数 AR マーカの切り取り及びデータベースへの格納	19
3.8	複数マーカのグループ分け及び認識による分岐処理	19
3.9	AR マーカが組み込まれた鳥型折り紙	20
3.10	切り分けられた AR マーカ	20
3.11	AR マーカ認識及び重畳表示の様子	21
3.12	複数の AR マーカを認識した際の重畳表示の様子	21

3.13	2つのARマーカからなる中央方向視点の求め方	22
3.14	折り紙の開閉に応じたCGの変化	24
3.15	2点間の距離に応じたアニメーションの変化	24
3.16	折る向きで変化する完成形のARマーカのイメージ	25
3.17	折り方の違いで変化するCGのイメージ	26
4.1	実験の様子	28
4.2	GoogleForm上のアンケート様式	29
4.3	「体験して楽しいと思うか」評価結果	31
4.4	「もう一度体験したいか」評価結果	32
4.5	「体験に難しさを感じるか」評価結果	32
4.6	「体験時にストレスを感じるか」評価結果	33
4.7	「折り紙用紙自体の柄のデザインに違和感を覚えるか」評価結果	34
5.1	実験に使用した折り紙作成手順書	51
5.2	GoogleForm上のアンケート	55

第1章 はじめに

折り紙とは、一枚の紙を折るという行為を繰り返すことで様々な形状を作ることを楽しむ日本の伝統文化の遊びの一つである。折り方に従えば身近な素材で誰でも作品を作れるため、子供から大人まで年齢にかかわらず多くの人々に親しまれている。また、手先を使い多様な形状を創作する特性から幼児の脳の活性に効果があるとされ [1]、初等教育での算数の授業に取り入れられるなど、教育分野で活用されている [2]。また、福祉分野では運動効果と精神的効果の両方が期待され、手先の訓練や身体機能の維持、カウンセリング等に取り入れられている [3][4]。

仮想現実 (Virtual Reality：以下、VR) や拡張現実 (Augmented Reality：以下、AR)、また、VR と AR を掛け合わせた技術である複合現実 (Mixed Reality：以下、MR) では、仮想空間とのインタラクションをもたらすものとして、視覚による情報の提示に限らず、味覚 [5] や触覚 [6] 等の様々な情報提示手法の研究が進められている。VR、AR、MR を総称してクロスリアリティ (Extended Reality：以下、XR) と呼ばれているが、このような技術は、多様な情報提示によってユーザの体験を拡張させるものとして、教育やエンタテインメント等、私たちの生活を豊かにするものとして考えられる。

折り紙と XR 等のデジタル技術を掛け合わせることで生まれる創造性を活かした新たなサービスの開発が進められている [7][8]。ユーザが作成した折り紙にスマートフォン等のデバイスをかざすと AR による映像や 3D アニメーションが投影されるというものである。折り紙と AR 技術を掛け合わせることでユーザに創造的体験を通じてデジタル情報を提供することができ、社会課題や製品等のプロモーションにも利用されている。しかし、大半のアプリケーションはあらかじめ作成された Computer Graphics(以下、CG) モデルを一方的に表示するのみで、作成した折り

紙を用いた相互のインタラクション(手に取って動かす等)は行えない。また、それらは折り紙に組み込まれた2次元形状のARマーカの認識に限定しているために、ユーザによる創作の幅を極度に制限してしまっている。このようなシステムの制限からユーザは飽きやすく、持続してARを通じた折り紙体験をすることは期待できない。

そこで本論文では、現実世界で作成した折り紙にデジタル情報を付加し、ARでの拡張演出(CGオブジェクトの重畳表示)及び3次元形状の折り紙の形状認識を利用したユーザとのインタラクションを構築することで、新たな折り紙体験の楽しみを増幅させることを目的とした、AR技術を用いた折り紙の体験拡張システムを提案する。本システムは仮想空間と現実空間をシームレスに繋ぎ合わせ、折り紙体験の拡張を実現するためのタンジブルユーザインタフェースとして設計した。タンジブルユーザインタフェースとは、マサチューセッツ工科大学の石井裕教授が提唱する、形のない仮想情報に直接触れるような実態感のあるユーザインタフェースを示す。ユーザは作成した折り紙をARグラスを通じて拡張演出及び折り紙を手で動かすことで重畳表示される仮想情報を操作することが可能である。

本稿では、全5章で構成されており、各章の構成と内容を以下に説明する。

初めに第1章で本研究であるAR技術を用いた折り紙の体験拡張システムの研究背景と目的を述べ、第2章で、伝統的な遊びにデジタル技術を用いた体験拡張の研究、折り紙とデジタル技術を掛け合わせた研究、触覚デバイス及びタンジブルユーザインタフェースに関する研究を紹介し、本研究の位置付けを明らかにする。第3章にて、システム概要とアルゴリズムについて説明し、第4章でシステムの評価実験、結果、期待される応用例を述べる。そして第5章で本研究のまとめ、制限、今後の課題を述べる。

第2章 関連研究

本章では、本研究の関連研究として、伝統的な遊びにデジタル技術を用いた体験拡張の研究、折り紙とデジタル技術を掛け合わせた研究、触覚デバイス及びタンジブルユーザインタフェースに関する研究を紹介する。

2.1 伝統的な遊びにデジタル技術を用いた体験拡張の研究

伝統的な遊びとデジタル技術を掛け合わせ新たな体験の提供及び体験の拡張を目的とした研究及び開発が進められている [9][10][11][12].

永井ら [9] は積み木を用いたインタラクティブ VR システムを提案している (図 2.1). このシステムでは実世界で積み上げたブロック形状の積み木が、仮想世界で精巧且つ躍動感のある城に変化するという体験を提供している. ユーザは積み木を積み上げる簡単な動作を行うだけで、任意に積み上げられた積み木に合わせた形状のリアルな城を仮想世界に生成することが出来る. ここでは透明なアクリルケース内で積み上げられた積み木ブロックをテーブルに組み込まれたレーザアレイによって検出し、仮想世界でも同じように積み上げられリアルタイムで精巧な 3DCG の城へと変化させている.

また、岩月ら [10] はモバイル型 AR 積木アプリケーションを提案している. このシステムでは、現実空間上で AR マーカを印刷したキューブを操作し、仮想空間上にユーザの意志に沿ってブロックを積み上げる体験を提供している. 大規模な環境を構築する必要はなく、AR マーカが組み込まれた印刷用紙とスマートフォンやタブレット等のカメラ付きデバイスがあれば体験が可能であり導入コストが低い.

福山ら [11] は「紙相撲」に着目し、仮想の力士と現実の力士が土俵上で組み合い対戦することを可能とする AR 紙相撲システムを提案している (図 2.2)。このシステムでは紙で作られた力士に AR マーカを組み込み位置座標を認識し、仮想空間上の力士と現実の力士が干渉した際に土俵下に置かれた電磁石アレイによって現実の力士に物理的な影響を与える。これによって仮想空間と現実空間の相互作用を行い、仮想世界との新たなインタラクションの実現を目指している。

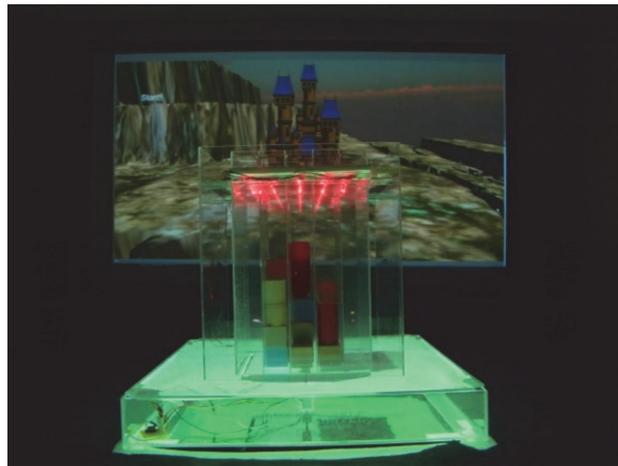


図 2.1: TSUMIKI CASTLE: 積み木を用いたインタラクティブな VR システム
<https://www.art-science.org/journal/v13n1/v13n1pp67/artsci-v13n1pp67.pdf>

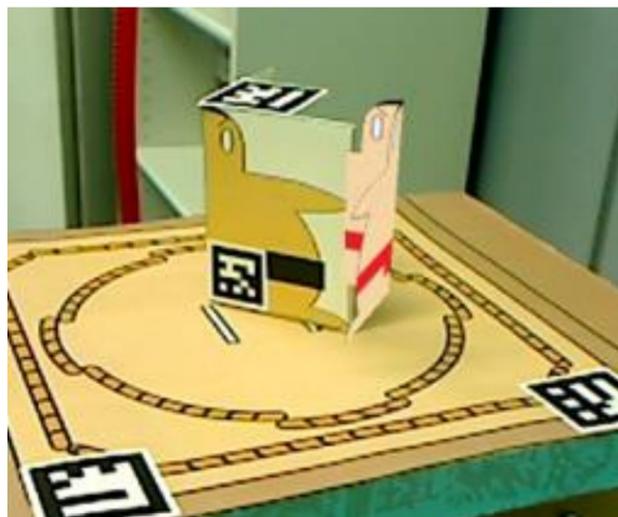


図 2.2: 仮想と現実の相互作用を実現する AR 紙相撲対戦システム
https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ej/?action=pages_view_main&inactive_action=repository_view_main&item_detailitem_id=187925&item_no=1&page_id=13&block_id=8

2.2 折り紙とデジタル技術を掛け合わせた研究

現在、折り紙の折り方を支援する方法として拡張現実 (AR) 技術を用いた研究が進められている [13][14]. 小澤ら [13] による拡張現実感技術を用いた折り紙作業支援システムの開発では, AR マーカを印刷した折り紙に AR を用いたアニメーションを重畳表示させることで, 誰でも迷わず折れる折り紙の製作指導を行っている. Song ら [14] による提案では折り紙体験に複合現実によるストーリー演出を施すことで, 折り紙体験プロセスのコミュニケーションの促進を図っている (図 2.3). この提案では HoloLens と Kinect カメラによるハンドトラッキングを組み合わせることで拡張演出を施しているが, 課題としてはハンドトラッキングによる拡張演出の操作のみに限定しており, 折り紙自体の形状の変化や, 実物の折り紙自体によるインタラクションが行えないために, 複合現実で成し得る現実物体と仮想上の拡張演出によるインタラクションは行えていない.



図 2.3: Mixed Reality Storytelling Environments Based on Tangible User Interface: Take Origami as an Example

https://ieeexplore.ieee.org/document/8798114action=pages_view_maininactive_action=repository_view_mainitem_detailitem_id=187925item_no=1page_id=13block_id=8

次に、折り紙とデジタル技術を掛け合わせた研究として、折り紙の製作段階の支援ではなく、完成後の折り紙を動かしたり眺めたりする体験に着目した研究も進められている [15][16]. 林ら [15] による折り紙のデジタルな演出の提案として、魚やカニといった生物を模した単色の折り紙に、生物の目や口、呼吸する様子を

表現したアニメーション等をプロジェクションマッピングによって折り紙上に投影するシステムがある(図2.4)。製作段階の支援ではなく完成した折り紙にデジタル演出を施すことで、折り紙体験の楽しみの増幅及び継続的な体験モチベーションの向上が図られる。また、この研究では多く利用されている白黒で無機質なARマーカから、周囲の景観に合わせた自然なARマーカのデザインとしての検討もされており、折り紙を通じて拡張現実感をより自然に楽しめる環境構築を目指している。

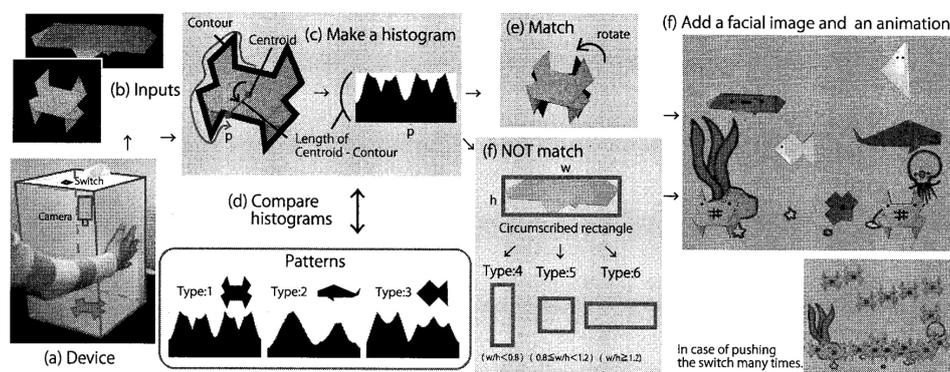


図 2.4: おりがみらいふ：折り紙のデジタルな演出の提案

https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ej/?action=repository_action_common_download;item_id=1411070;item_no=1;attribute_id=1;file_no=1

Grandhi ら [16] による提案では折り紙体験のたのしさの拡張として、ユーザによってデザインされた折り紙用紙をバーチャルな折り紙に反映し変化させる PlayGAMI という AR 折り紙システムがある(図 2.5)。折り紙用紙自体に特徴点となるパターンを組み込むことで安定した認識精度が保たれている。しかし、これらの研究では立体的な 3 次元形状の折り紙の認識には対応しておらず、平面の 2 次元形状の折り紙の認識に限定しているために、ユーザによる創作の幅を極度に制限してしまっている。また、折り紙の動きに合わせた相互のインタラクションは行えないために飽きやすく、持続して体験することは期待できない。

そこで、本研究では折り紙にデジタル情報を付加し、AR での拡張演出及び 3 次元形状の折り紙の形状認識を利用したユーザとのインタラクションを構築することで、新たな折り紙体験の楽しみを増幅させることを目的とする。そして、折り紙を折ることで得られる現実での身体動作を伴った創造性の育成やリハビリテーションへのモチベーションの向上及び促進を図る。



図 2.5: PlayGAMI: Augmented Reality Origami Creativity Platform
<https://applion.jp/iphone/app/1442054588/>

2.3 触覚デバイス及びタンジブルユーザインタフェースに関する研究

現在，VR/AR での仮想情報を操作する際の様々なコントローラの開発が進められている。VR では一般的に VR ゴーグルやヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display : HMD) を装着し，3D ゲームなどの仮想空間でオブジェクトを操作する [17]。VR ヘッドセットに合わせたコントローラが様々存在するが，基本的にはスティックやボタン，トリガー，タッチパッド等を用いて操作する。アナログスティックやボタンを組み合わせた操作によって，仮想空間上のオブジェクトを掴むような操作や，引き金を引くような操作を体感できる。しかし，コントローラを介した疑似的な体験には限界がある。そうした課題の解決方法として注目されているのがグローブ型の触覚デバイスである。これは手袋型のデバイスであり，複数のセンサによって指の状態を感知し，流体アクチュエータ等で圧縮制御することでリアルな触覚フィードバックを提供している [18]。

AR での仮想オブジェクトを操作するコントローラとしては主に3種類存在する。物理的コントローラ，ハンドトラッキング，そしてタンジブルユーザインタフェース (Tangible User Interface : TUI) である (図 2.7)。物理コントローラは様々なセンサが搭載されたリモコンを操作する (図 2.7(a))[19]。ハンドトラッキングでは手の動きに着目し，ジェスチャや手全体のトラッキングを活用したインタラクション



図 2.6: HaptX Gloves G1
<https://g1.haptx.com/learnabout>

である (図 2.7(b)(c))[20][21]. タンジブルユーザインタフェース (以下, TUI) とは, マサチューセッツ工科大学の石井裕教授が提唱する, 形のない仮想情報に直接触れるような実態感のあるユーザインタフェースである (図 2.7(d))[22]. Henderson ら [23] は自然のアフォーダンスを拡張現実のための有形ユーザインターフェースとして活用することは機能的であると主張している. 例えば, 航空機のエンジンの保守点検を模した実験では, 被験者は整備士がエンジンを整備する際に参考となるドキュメントを AR で表示することができ, 2 種類のインタフェースでの操作を行った. 1 つは単なる AR 上の仮想ボタンで, もう一つは点検現場に付属されているネジやファスナー等を用いた動作 (なぞる, ひねる等) にリンクして操作が可能な有形ユーザインタフェースである. その結果, 機械的な点検作業において, 有形ユーザインタフェースの使用は仮想ボタンの使用時よりも作業時間が大幅に短縮したことがわかった. そういった観点で, 物理的触覚的フィードバックのある有形ユーザインタフェースはユーザにとって直感的で使いやすいものであると主張している.

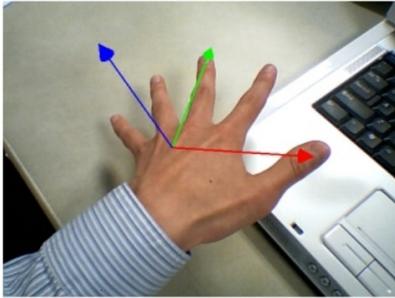
そうした利点を持つ TUI の研究が進められている [24][25][26]. Adam ら [24] は



(a)Physical Controller, Magic Leap 1
<https://www.expandreality.io/product/Magic-Leap-1>



(b)Hand Tracking, Leap Motion
<https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller/>



(c)Gesture, HandyAR
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4373785>



(d)Tangible User Interface, Reactable
<https://www.ycam.jp/archive/works/reactable/>

図 2.7: 様々な AR コントローラ

電源不要でコンパクトな AR コントローラを提案している。この研究では環境に制限されず外出先でも利用が可能で日々の生活で使用しやすいコントローラの開発を目的としている。AR 環境では、物理的コントローラでは携帯性やバッテリーの寿命が大きな問題となる。TUI でも外出先で使用するためには、簡単に配置できるようなコンパクトさが必要である。また、長時間使用しても機能が失われないように、低消費電力であることが望まれる。コントローラは図 2.8 に示すようにテープバンドのように長細い形状で 4 つの AR マーカが印刷されている。実現可能なインタラクションは回転、包み込み、折りたたみ等の 6 パターンある。このような安価で使い捨てのリサイクルが可能な入力デバイスは、コンサート等のイベントで大勢のユーザが使用することが可能であり、導入コストが低いという利点がある。

Prototype →

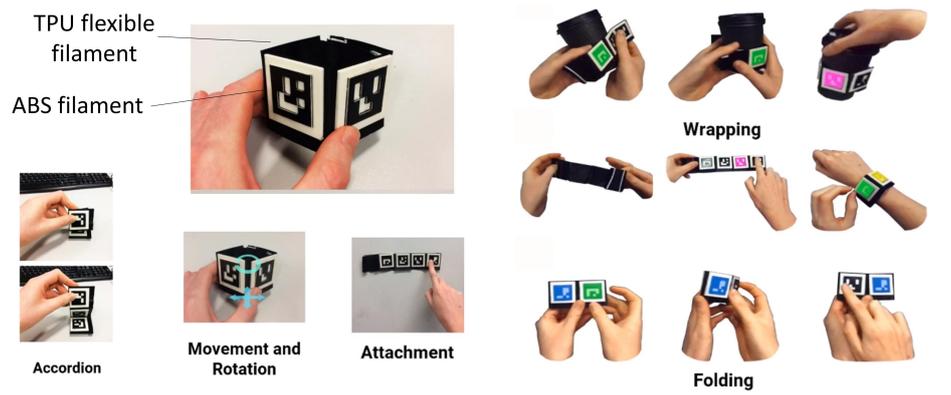
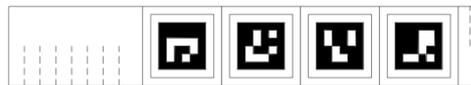


図 2.8: Turning everyday objects into passive tangible controllers
<https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3430524.3442460> を元に著者が手を加え作成した

第3章 提案手法

本章では、初めに本システムである AR 技術を用いた折り紙の体験拡張システムの概要及びユーザによる体験の流れを説明し、開発環境及びシステムフローを示す。次に、本研究における安定した重畳表示精度を確保するための折り紙用紙への AR マーカの最適な組み込み方法について述べる。また、折り紙に組み込まれた複数の AR マーカのパターンを活用した 3 次元折り紙の形状認識の手法を述べ、それに伴うユーザの操作による CG の形状変化及び CG へのインタラクションを可能とするシステムの構築について述べる。そして、本システムで用いる AR マーカを組み込んだ折り紙用紙の特性を活用した、ユーザの折り方によって AR 表示される CG に変化が起こる機能について述べる。

3.1 システム概要

本システムの体験イメージを図 3.1 に示す。本システムでは、AR グラスと AR マーカを組み込んだ折り紙用紙を使用する。

はじめに、ユーザは AR マーカを組み込んだ折り紙用紙を用いて指定した折り紙を自らの手で作成する。次に、完成した折り紙を AR グラス搭載のカメラに映すと、デバイスにあらかじめ用意された折り紙の形状に対応した生物等の CG がリアルタイムに重畳表示される。続いて、折り紙に組み込まれた AR マーカの角度や位置関係を AR グラス搭載のセンサ (RGB カメラ) で認識し、AR マーカ上の適切な位置に CG を重畳表示させることで、CG と現実空間の折り紙の形状をリンクさせる。そして、折り紙に組み込まれた AR マーカの角度や位置座標をリアルタイムに認識し、折り紙に対する操作 (移動、回転、開く、閉じる) に応じて、CG のアニメーションの形態を同期させることで、拡張演出が施される。これらの詳

しいシステム上の処理は3.5節, 3.6節で述べる. これにより, ユーザは現実空間で作成した折り紙の操作によって, 仮想空間の結果に影響を及ぼすことができる. これらを通して, 現実空間で折り紙を動かすことで, 仮想上のCGをあたかも直接手で触れるような体験を可能とする. さらに, ユーザの折り紙の折り方によってARマーカのパターンが変化する特徴を活かし, 作成者によってAR表示されるCGが変化する機能を搭載した. 詳しい説明は3.7節で述べる. これにより, ユーザが一度作成した後に再度別のパターンでの折り方を試し, 多種多様な創造性を活かした持続的な体験が提供される. また, 複数人でAR折り紙を作成した際に個人間で表示されるCGの変化を楽しむことができ, 創発的コミュニケーションが生まれる. このように, 本システムを通じて新たな折り紙体験の拡張及び持続的な体験を提供することができる.



図 3.1: 体験イメージ

3.2 開発環境

AR マーカを用いた CG の重畳表示の手法として、Unity と Vuforia, AR グラスとして Microsoft 社 [27] の HoloLens2 を採用する (図 3.2).

Unity はゲーム作成向けの統合開発環境である。CG を主に扱う AR との相性は良く、マルチプラットフォームと対応しており今回使用する HoloLens への出力にも対応している。

Vuforia は AR ライブラリであり、様々な形状の AR マーカを取り込むことが可能で、AR マーカの特徴点を捉えてカメラ座標系に対する位置姿勢推定を行う [28]。Vuforia ではロバストな特徴点認識処理によって、AR マーカの一部が欠けた状態での認識・追従にも対応している。本システムでは Vuforia を用いて、AR マーカに対する CG オブジェクトを重畳表示させる基準となる座標を獲得する。あらかじめ、完成形の折り紙から各パーツ (頭, 胴体, 翼など) の AR マーカを切り取り、Vuforia に特徴点を格納し、複数のマーカを同時に認識させることで折り紙の位置姿勢推定を行う。

HoloLens2 は Microsoft 製の複合現実 (Mixed Reality : MR) を実現するデバイスである。MR は VR と AR を融合したもので、現実世界と仮想世界を組み合わせる技術である。現実世界に仮想世界の情報や CG を取り込み、あたかもそこに存在しているかのように操作ができるような体験を可能とする。HoloLens2 はシースルーホログラフィックレンズを搭載しており、ディスプレイが半透明で実際の外界が光学的に見えるオプティカルシースルー方式を採用している。また、加速度センサ、角速度センサ、磁気センサ、Azure Kinect センサが搭載されており、ハンドトラッキングやアイトラッキング (視線追跡) による操作が可能である。精度の高いセンサと高性能プロセッサによる操作性の高さから本システムの形状認識及び重畳表示デバイスとして採用した。

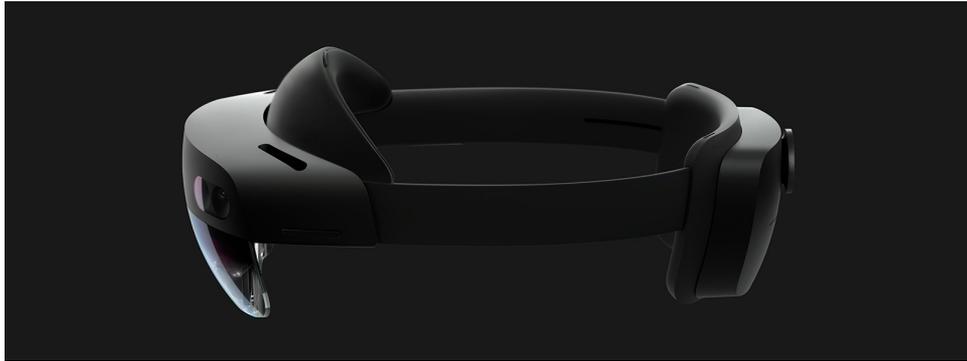


図 3.2: HoloLens2
<https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens/hardware>

3.3 システムフロー

本システムフローを図 3.3 に、システム構成図を図 3.4 に示す。初めに、AR ゴーグルとなる HoloLens2 の接続設定を行い、読み込まれた Unity データの初期化及び立ち上げを行う。そこから AR マーカが組み込まれた折り紙を HoloLens2 搭載のカメラ (1080p, 30fps) で認識する。続いてメインループの工程として、搭載カメラを用いて折り紙に組み込まれたマーカを検出し、折り紙の座標位置を決定する。検出座標を基に描画 CG を実際の折り紙に重畳表示させる。複数のマーカによる位置座標及び角度変化に応じて CG のアニメーションを変化させる。仕組みについては 3.5 節で詳しく述べる。これらの処理をリアルタイムに繰り返し行う。

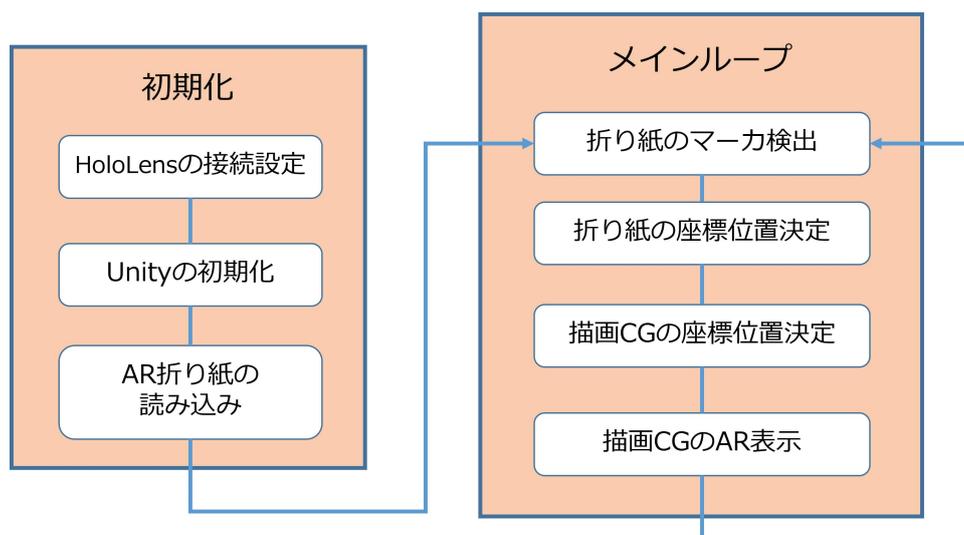


図 3.3: システムフロー

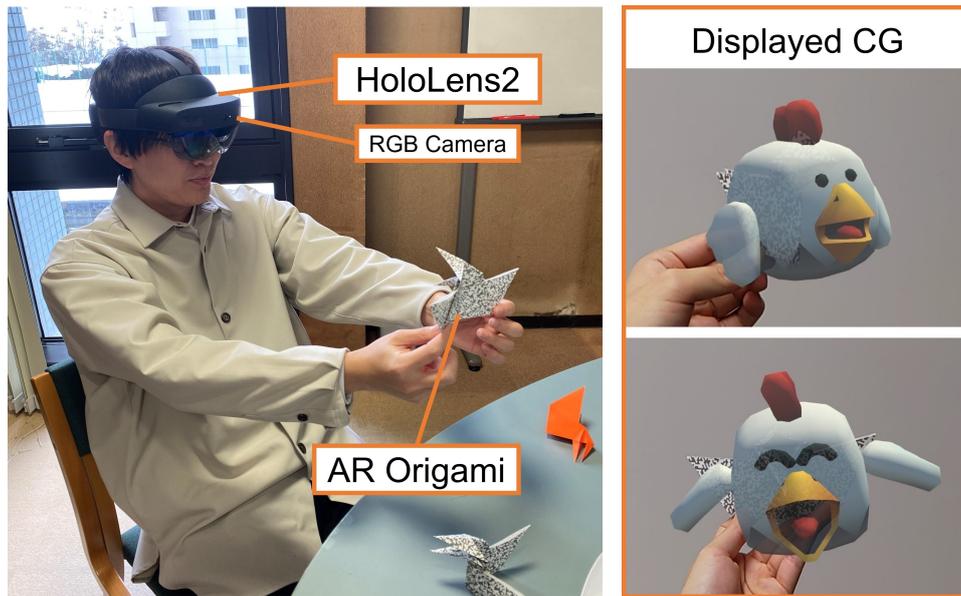


図 3.4: システム構成図

3.4 折り紙への最適なマーカ組み込みの検証

本研究における安定した重畳表示精度を確保するために、折り紙用紙への AR マーカの最適な組み込み方法を模索し検証を行う。

AR 技術は大きく 2 種類に分かれており、GPS の位置情報に紐づけて視覚情報を提示するロケーションベース型、画像・空間認識の技術を用いて指定されたオブジェクトを読み込むことで AR 表示させるビジョンベース型がある。また、ビジョンベース型にはマーカ型 [29][30] とマーカレス型 [31] があり、マーカ型では識別用パターンの AR マーカの位置・姿勢をカメラの画像から推定する方法である。一方、マーカレス型は特定の画像やイラスト等のマーカの認識ではなく、撮影画像から物体の形状や環境を認識し AR コンテンツを表示させる技術である。本手法では細かな形状変化を読み取るために、認識の安定性の高いマーカ型 AR を採用した。

本システムでは折り紙に組み込まれた AR マーカを認識することで位置座標及び形状変化を検出する。Nreal[32]によると、最適な AR マーカの条件として、特徴点が分散されている、自己類似度が低い画像等が挙げられている。一般的に AR

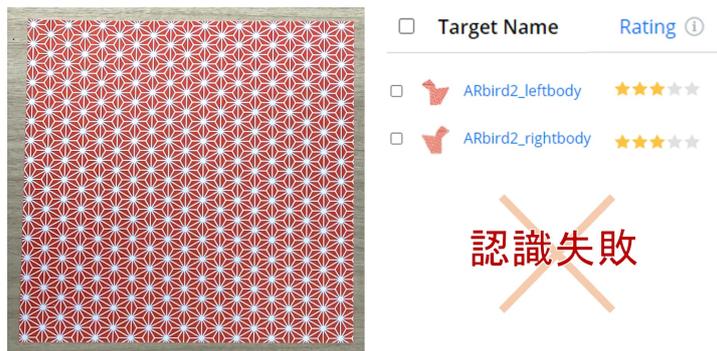
マーカは画像認識が容易になるために、モノクロで無機質なデザインが多い。本システムでは、ユーザの視点から AR マーカの存在がはっきり目立たないような自然なデザインを目指し、マーカ自体を特殊なパターンとして紙一面に組み込んだ。

適切なパターンを模索するために、予備実験として市販に売られている一面がパターンの折り紙を4種類用意し、Vuforiaによる認識精度検証をそれぞれ行った。実験の手順としては、初めに4種類の折り紙で作成した鳥型折り紙の表面・裏面のスキャンデータを Vuforia の AR マーカとして登録する。そして、格納された AR マーカが Web カメラ (1080p, 30fps) に映りこみ、認識した際にオブジェクトが生成されるように Unity 上でシステムを設計した。検証結果を図 3.5 に示す。結果から (c) のパターンのみが安定して認識することができた。図 3.5 の右側に示すように、Vuforia では AR マーカをデータベースに格納した際に、その AR マーカが安定した認識精度を保つのに適しているかを評価し Rating として表示される。星が5つの場合が高評価であり、AR マーカとして安定した認識がされるものとして示される。結果から、繰り返しパターンとなるランダム性の低いパターンは、AR マーカとして評価が低い傾向がみられた。上下左右が対称であるパターンは形状認識精度に影響を及ぼすことがわかる。(c) の様に、繰り返しパターンではなく、ランダム性の高いパターンが好まれることがわかった。

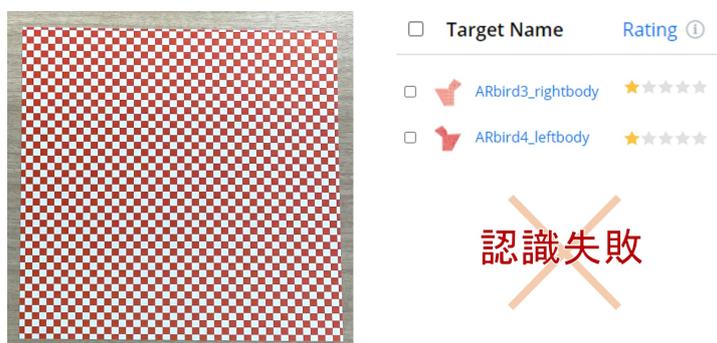
予備実験の検証結果から、上下左右に非対称でランダム性が高いものとして、コンテンツサイトである iStock[33] から幾何学デザインを参照し、図 3.6 に示す AR マーカを組み込んだ折り紙用紙を作成した。

3.5 複数 AR マーカを用いた3次元折り紙形状認識

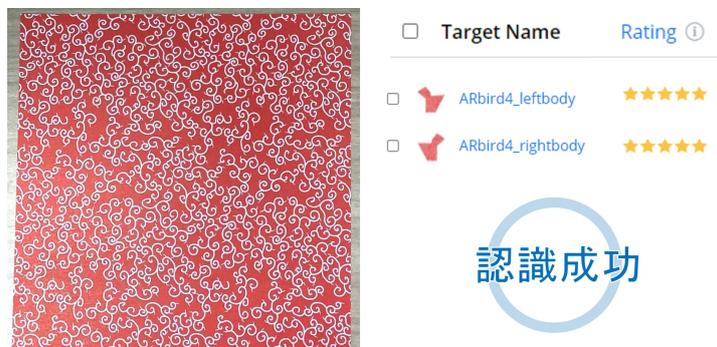
本システムでは多面的な折り紙の形状認識の手法として、折り紙に組み込まれた複数の AR マーカのパターンを活用する。本システムでは形状認識として3.2節で述べた Vuforia を活用しているが、この Vuforia では任意のイラストを AR マーカとしてデータベースに格納することが可能である。図 3.7 に示すように、前準備として完成形の折り紙から各パーツ(頭、胴体、翼など)の AR マーカを切り取り、Vuforia のデータベースに格納している。パーツの決定においては、認識精度の安



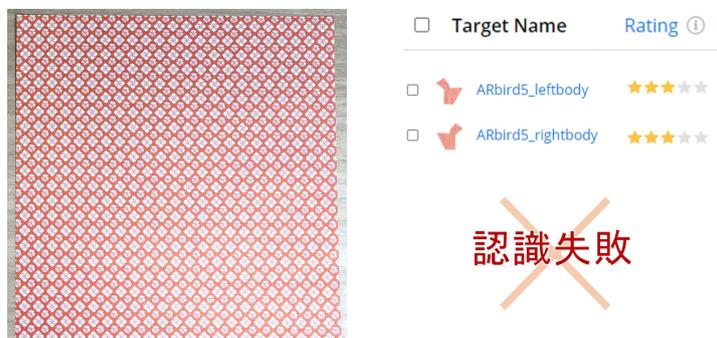
(a)



(b)



(c)



(d)

図 3.5: 予備実験での認識精度検証結果

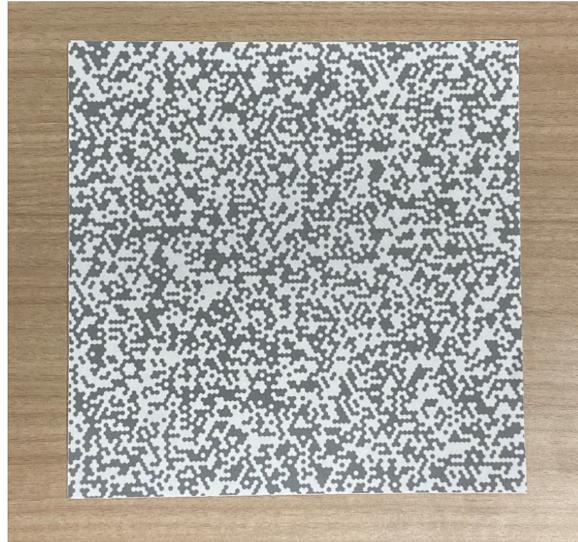


図 3.6: AR マーカを組み込んだ折り紙
<https://www.istockphoto.com/jp/> を基に作成

定する面積の広い部分を推奨する．切り分けるパーツは完成形の折り紙の全体をスキャナで読み込むことでデータ化し，パーツ部分(頭，胴体，翼など)に合わせてトリミングしている．立体形状によってフラットベットによるスキャンが困難である場合は，パーツごとに裁断して個別にスキャンする．続いて，多面的な折り紙を様々な角度から認識するために，図3.8に示すように，左右の側面，正面背面などの様々な角度ごとに認識しやすい面のパーツを(目視による判断で)グループ分けし，グループごとのパーツの認識の可否によって折り紙がどの方向を向いているかを認識する．そして，各グループに適応した角度に表示されるCGを紐づけることで，グループごとに姿勢操作することが可能となり，様々な角度に応じて表示されるCGの向きを制御している．

4章で示す実験では，プロトタイプとして鳥型の折り紙に本システムを導入した．AR マーカを組み込み作成した鳥型の折り紙を図3.9に示す．作成手順に関しては折り紙 JAPAN[34]を参照した．この形状の折り紙を採用した理由として，本システムの目的でもある折り紙との相互インタラクションの拡張要素でもある折り紙を実際に手で動かして遊べるという点である．この折り紙は両翼部分を両手で持ち，閉じたり開いたりすることでくちばしの開閉を行うことができる．

完成した折り紙の左側面と右側面のスキャンデータからボディ部分のパーツを

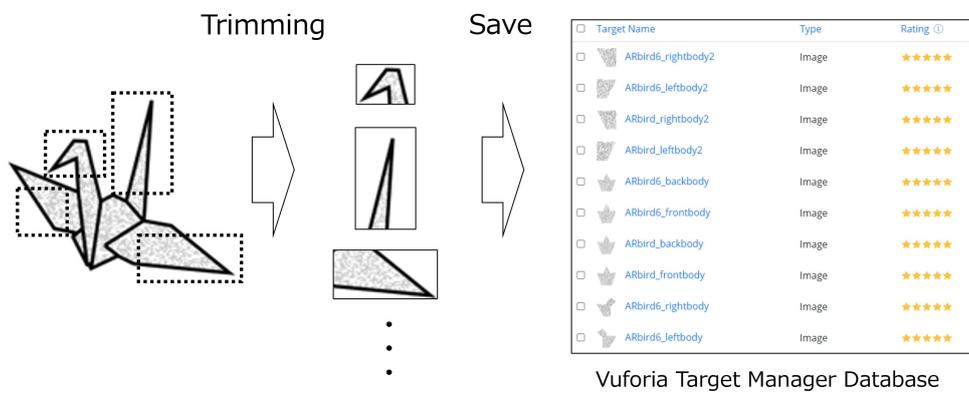


図 3.7: 複数 AR マーカの切り取り及びデータベースへの格納

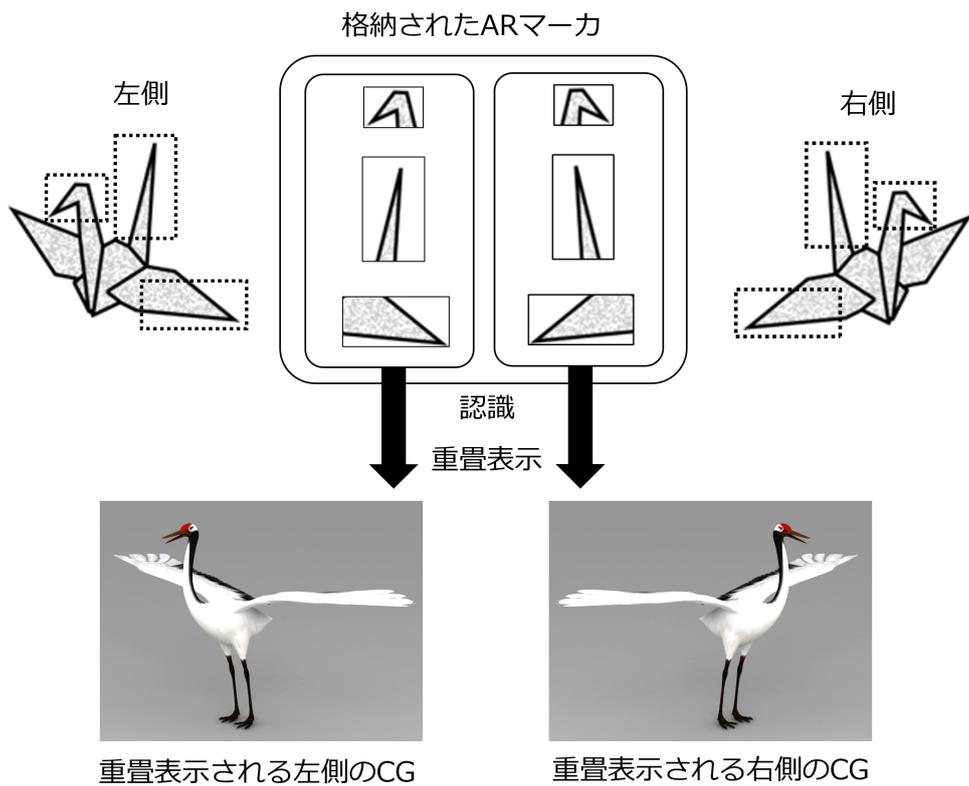


図 3.8: 複数マーカのグループ分け及び認識による分岐処理
<https://done3d.com/red-crowned-crane/> を基に作成



図 3.9: AR マーカが組み込まれた鳥型折り紙

切り分け (図 3.10), AR マーカとして Vuforia に格納する. Vuforia に格納された左側面のボディ部分の AR マーカ (Left Body) と右側面のボディ部分の AR マーカ (Right Body) は Unity を通じて位置姿勢推定を行い, CG オブジェクトの基準座標を獲得する. 検出された AR マーカの座標上に CG を重畳表示させる.

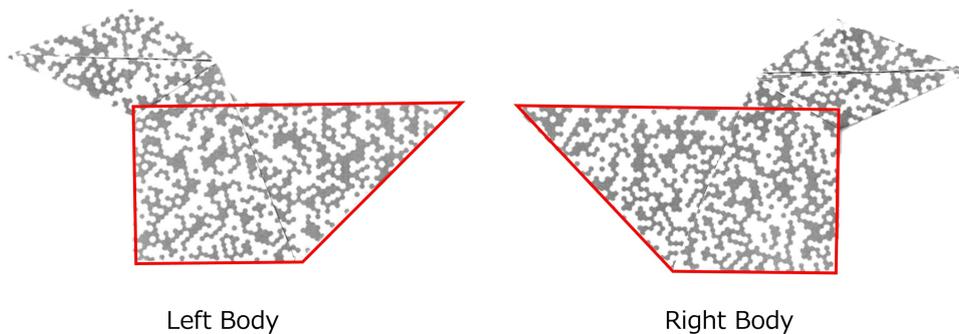


図 3.10: 切り分けられた AR マーカ

本実験では 3D モデルとして, 胴体・翼・くちばし等のパーツが独立しており, アニメーションによる姿勢変化制御が可能である理由から, BitGem[35] が提供する鳥型 3D オブジェクトを利用した. 図 3.11 に示すように, 片側の AR マーカが検出されれば, 折り紙を覆うように CG が重畳表示される. 尚, CG が重畳表示される座標は AR マーカの検出座標と CG の中心座標が一致するように Unity 上で調整し配置している. また, 図 3.12 に示すように, 左右の AR マーカが同時に認識し

た場合に、正面を向いたCGが表示されるようにプログラムを構築している。正面を向いた場合のCGの表示方向は、図3.13に示すように、原点(図中のO)から左右のARマーカそれぞれの面を垂直に通る法線ベクトルを1[m]伸ばした点(図中のL, R)の座標の中間点(図中のC)を向くように設計している。Unity上の1[m]の長さは、原点Oからある程度距離を離すことで中間点に対する視線が安定するために、Unity上のARマーカのスケールの20倍に設定している。また、ベクトルOCは

$$\vec{OC} = \frac{\vec{OL} + \vec{OR}}{2}$$

で示される。そのように設計することで、複数のマーカを用いた重畳表示を行った際のユーザによる回転操作に対しても、CGモデルを折り紙と同様の正しい方向で表示することができる。



(a) 処理前のAR折り紙



(b) HoloLens 上での処理後の様子

図 3.11: AR マーカ認識及び重畳表示の様子



(a) 処理前のAR折り紙



(b) HoloLens 上での処理後の様子

図 3.12: 複数のARマーカを認識した際の重畳表示の様子

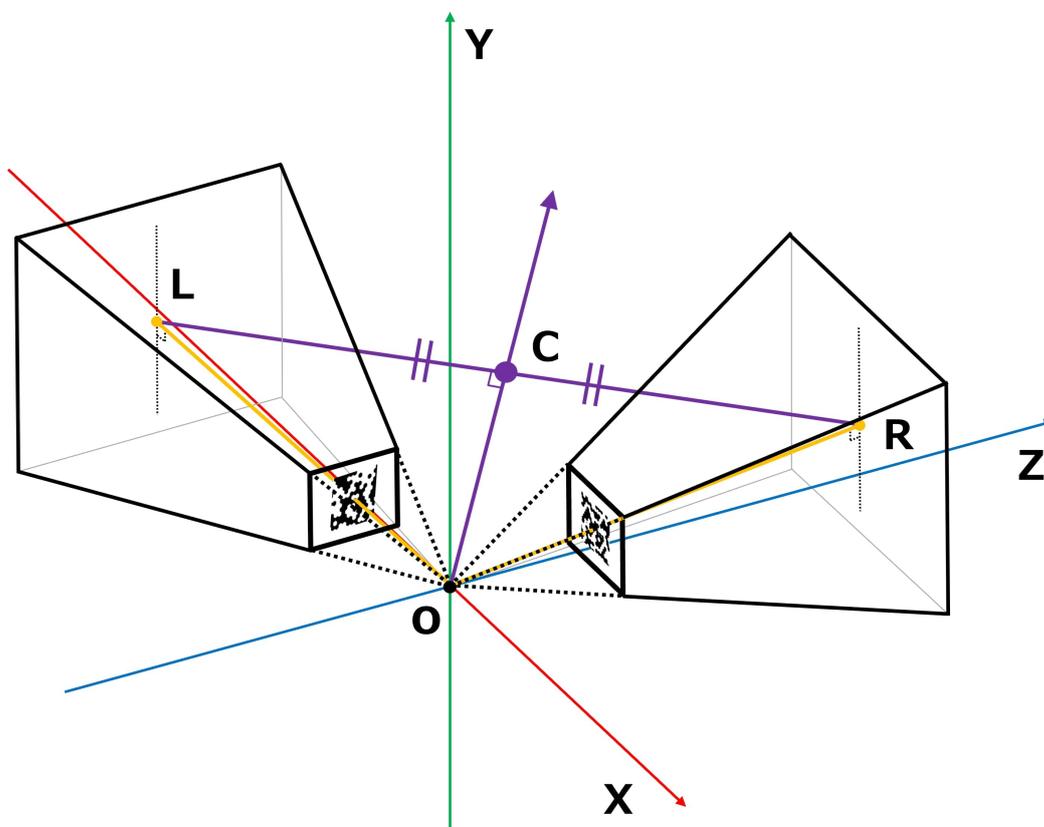


図 3.13: 2つの AR マーカからなる中央方向視点の求め方

3.6 ユーザの操作による CG の形状変化

3.5 節で 3 次元折り紙の形状認識について述べた。前準備として完成形の折り紙からパーツの AR マーカを切り取り、Vuuforia に特徴点を格納している。そこで、切り分けられた複数のマーカの認識の可否、マーカごとの座標及び角度検出によって折り紙の細かな形状認識を行い、形状変化による CG へのインタラクションを可能とするシステムを構築する。

4 章で示す実験で扱う鳥型の折り紙は両翼部分を開閉するように動かすことでくちばしも同様に開閉する。そこで、左右のボディ部分の AR マーカを認識した際に、Vuuforia によって獲得される AR マーカの座標から、それぞれの座標の差分をリアルタイムに算出する。3 次元空間における 2 点間の距離はユークリッド距離で示される。図 3.13 における L と R の 2 点間距離を示している。そして、Unity 上で鳥型 CG オブジェクトの両翼とくちばしが開閉する動作アニメーションを設定し、前述で得られた 2 点間の距離の値をアニメーションの進行度パラメータとなる変数に代入する。そのように設計することで、実際の折り紙を開いたり閉じたりする動作にリンクして CG オブジェクトを操作することが可能となる。図 3.14 に示すように、折り紙を閉じた場合には鳥型 CG の両翼とくちばしはある程度閉じているが、折り紙を開いた場合には両翼とくちばしが同様に開いている。図 3.15 に示すように、折り紙開閉によるアニメーション変化のパラメータは、左右の AR マーカの中心座標の差分の最小値と最大値、つまり、折り紙を最大限に開いた状態の 2 点間の距離と折り紙を折り畳んだ状態の 2 点間の距離を実際の折り紙を用いてキャリブレーションし、アニメーションの始点と終点に設定している。そして、折り紙の開閉具合に合わせて「開」と「閉」の各姿勢パラメータを 100 段階で補間しリアルタイム且つ滑らかに処理している。

本手法は鳥型折り紙に限らず、開閉による 2 点間距離の変化を用いたアニメーションをデザインすることが可能である。また、開閉動作に限らず、蛇腹状の折り紙の伸び縮み動作による 2 点間距離の変化や、別々の折り紙同士の距離間を利用したアニメーションデザイン等が実現可能である。

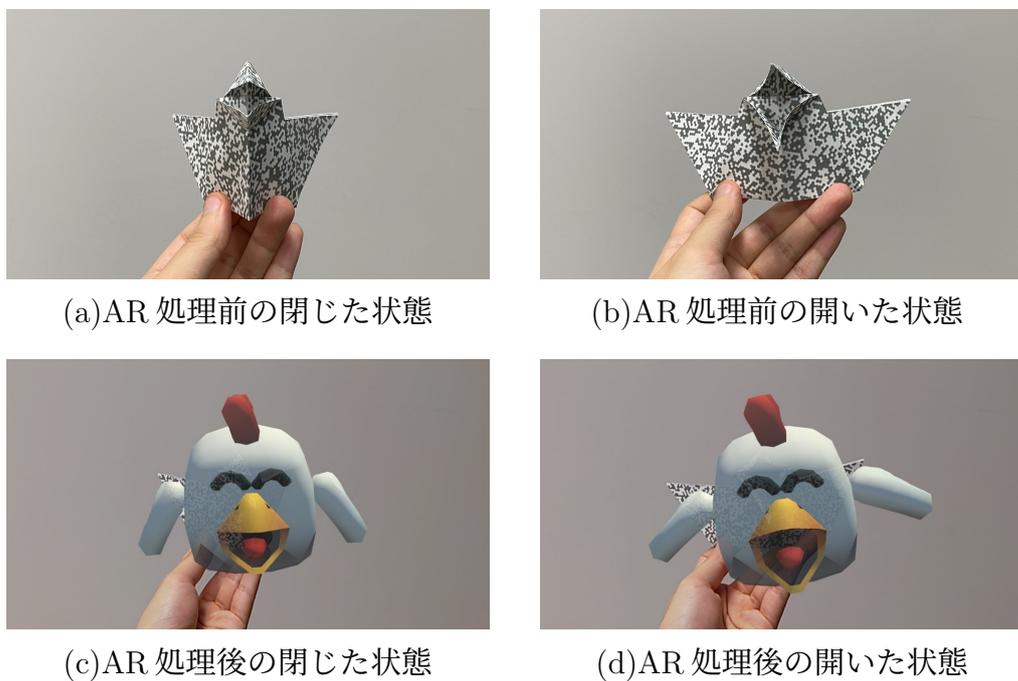


図 3.14: 折り紙の開閉に応じた CG の変化

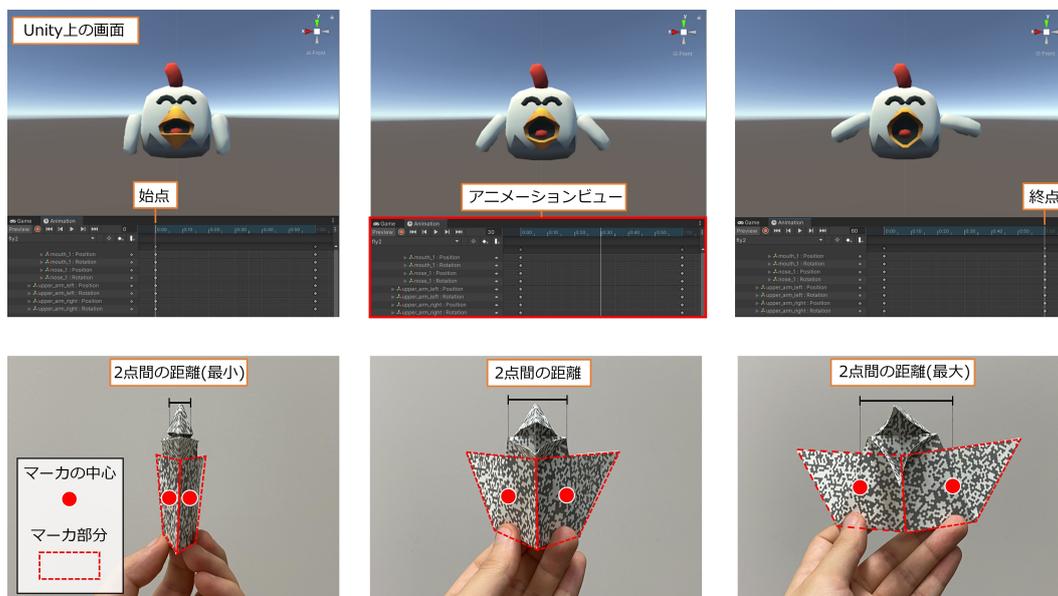


図 3.15: 2点間の距離に応じたアニメーションの変化

3.7 ユーザの折り方よる CG オブジェクトの変化

本システムは折り用紙紙全体に AR マーカを組みこむことで、ユーザの折り紙の折り方によって完成形の AR マーカのパターンが変化する特徴を活かし、作成者によって AR 表示される CG が変化する機能を搭載した。図 3.6 に示す折り紙に組み込まれた AR マーカのデザインはランダム性の高いパターンであり、上下左右非対称である。したがって、ユーザがどの向きで折り紙を折るかによって完成形の AR マーカは変化する。例えば、実験で扱う鳥型の折り紙の認識に使用した左右のボディ部分はそれぞれ 4 パターン (上下左右) 存在することになる。色分けしたイメージ図を図 3.16 に示す。4 パターンの完成形の AR マーカを Vuforia のデータベースに格納し、認識する AR マーカごとに表示される CG を変更することで、ユーザによる折り方によって重畳表示される CG を変化させることができる。図 3.17 にユーザの折り方による AR マーカの変化と各 AR マーカに表示される CG の認識条件をイメージしたものを示す。図 3.17 に示すように、AR マーカ自体の形状が同じであってもパターンの違いによって、表示される鳥型 CG の目の形状が変化している。図中 (a) では小さな丸、(c) ではバツ印になっている。

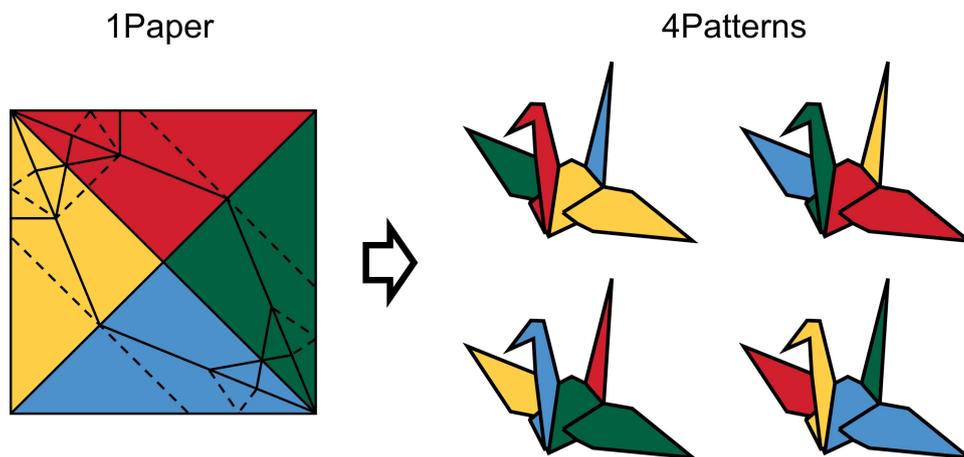


図 3.16: 折る向きで変化する完成形の AR マーカのイメージ

これにより、ユーザが一度作成した後に再度別のパターンでの折り方を試し、多種多様な創造性を活かした持続的な体験が提供される。また、複数人で AR 折り紙を作成した際に個人間で表示される CG の変化を楽しむことができ、創発的コ

コミュニケーションが生まれる。このように、本システムを通じて新たな折り紙体験の拡張及び持続的体験を提供することができる。

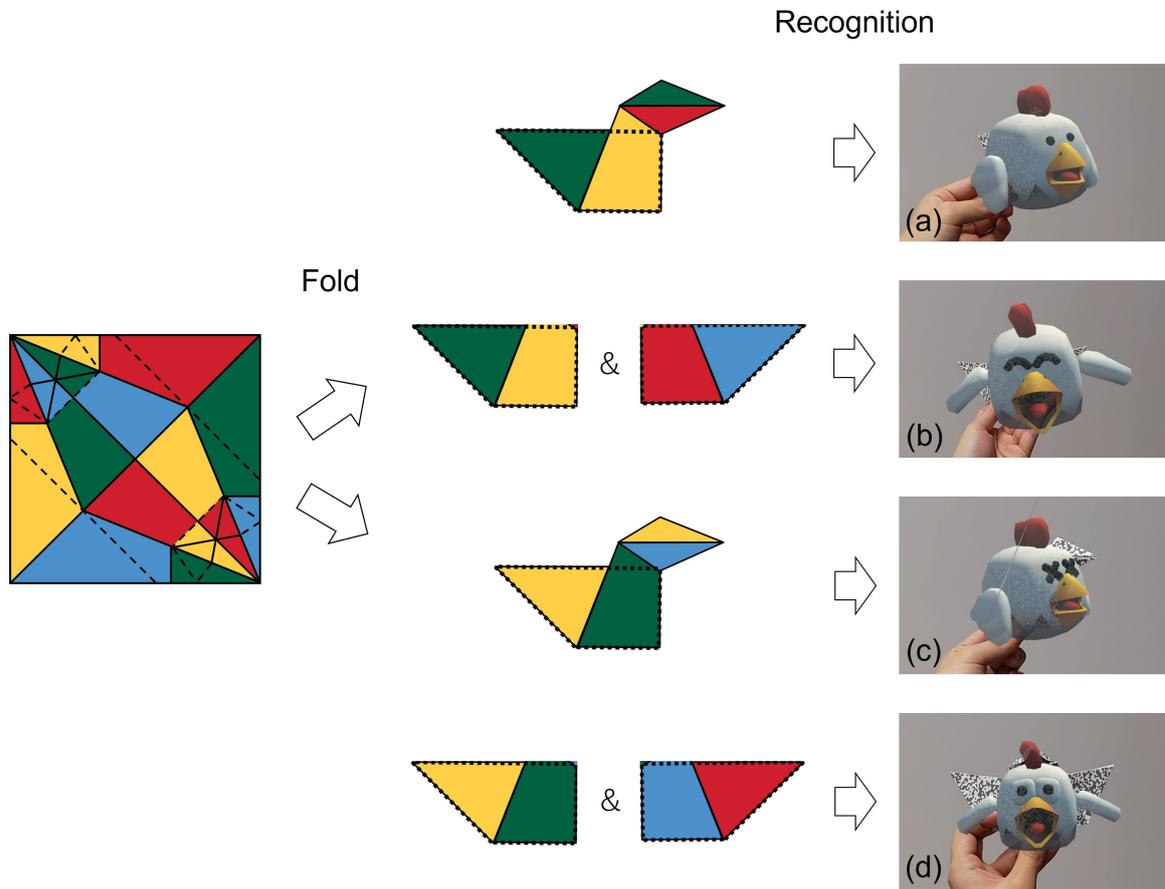


図 3.17: 折り方の違いで変化する CG のイメージ

第4章 実験・評価

4.1 実験手順

本システムによる折り紙体験の拡張，体験モチベーション，ユーザビリティを評価するために，システムを活用した折り紙体験を通じた評価実験を行った．実験に参加した被験者は31名である．年齢は20代が中心(9割)で，女性が8人，男性が23人である．評価実験の方法としては，被験者に市販の折り紙用紙とARマーカを組み込んだ折り紙用紙を用いて，鳥型折り紙を作成してもらい，完成したAR折り紙をARグラスを通じて重畳表示されるCGを操作してもらう．評価実験後，アンケート調査を行った．

実験手順として，初めに被験者に実験概要を説明し，市販の単色折り紙を一枚選んでもらい，事前に用意した鳥型折り紙の作成手順書を参考に作成してもらった．作成手順書は折り紙 JAPAN[34]が公開している折り方を参考に作成した(付録にて記載)．手順がわからない場合は適宜サポートを行った．市販の折り紙で鳥型折り紙が完成した後，ARマーカが組み込まれた折り紙で再度鳥型折り紙を作成してもらった．ARマーカが組み込まれた折り紙で鳥型折り紙を作成し完成したら，HoloLens2を装着してもらい，自ら作成した折り紙を手に持ち正面にかざしてもらった．手に持った折り紙を移動，回転，開閉を行ってもらうことで折り紙を通じて重畳表示される仮想空間のCGとのインタラクションを体験してもらった．また，折り方の違いによって表示されるCGが変化することを伝え，折り方の違う折り紙を渡してCGの変化を確認してもらった．その後GoogleForm上のアンケートに各自の所有するスマートフォンで回答してもらい実験終了となる．実験の様子を図4.1に示す．

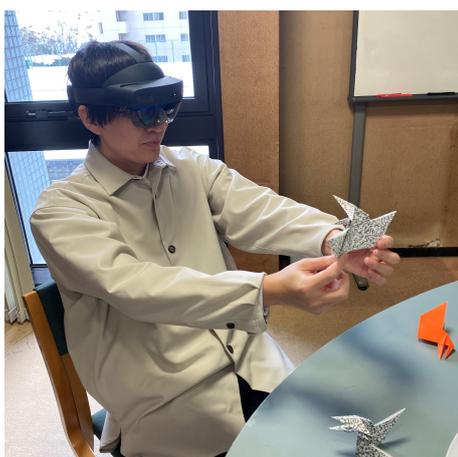


図 4.1: 実験の様子

4.2 アンケート項目の選定

アンケート調査には、システムによる体験を通じての被験者の主観的評価を行う項目を選定した。アンケート冒頭に被験者データとして年齢、折り紙の経験があるかどうか、ものづくりの経験があるかどうか、ARグラスの使用経験があるかを回答してもらった。そして、システムの評価実験としてのアンケート項目を以下に示す。

- 体験して楽しいと思うか
- もう一度体験したいか
- 体験に難しさを感じるか
- 体験時にストレスを感じるか
- 折り紙用紙自体の柄のデザインに違和感を覚えるか

	1	2	3	4	5	
全くそう思わない	<input type="radio"/>	とてもそう思う				

図 4.2: GoogleForm 上のアンケート様式

尚、図 4.2 に示すように、それぞれの項目は 1~5 の 5 段階評価で、1 が「全くそう思わない」、5 が「とてもそう思う」を示している。また、上 4 つの項目については通常の折り紙 (市販の単色折り紙) の体験と本システムである AR 折り紙体験それぞれの評価を行っている。加えて、5 段階評価の項目以外の感想を得るため、体験した感想と体験時に気になったことを自由記述してもらった。また、アンケート項目のシステム体験による主観的作業負担尺度として芳賀ら [36] による日本語版 NASA-TLX によるメンタルワークロード測定を参考にした。

項目 1 の「体験して楽しいと思うか」では、折り紙を折る工程に加えて、折り紙を通じて仮想空間に触れて、操作に伴うインタラクションを含めたシステム体験全体の楽しさについて調査する。項目 2 の「もう一度体験したいか」では、シ

システム体験を通じて、再度体験したいというモチベーションがみられるかについて調査する。項目3の「体験に難しさを感じるか」では、作業負担尺度として、折り紙を折る工程、システム体験における知覚的活動や身体的活動をどの程度要するかを調査する。項目4の「体験時にストレスを感じるか」では、作業中にストレスをどの程度感じるか、また、満足感、充足感をどの程度感じるかを調査する。項目5の「折り紙用紙全体の柄のデザインに違和感を覚えるか」では、本システムで使用しているランダム性の高いパターンのARマーカデザインに違和感を覚えることなく、自然なデザインとして受け入れられるかを調査する。

4.3 アンケート調査の結果

アンケート評価結果を図4.3-4.7に示す。図4.2に示すように、グラフ内の数値は1~5の5段階評価で、1が「全くそう思わない」、5が「とてもそう思う」を示している。

4.3.1 体験の楽しさ

図4.3に、「体験して楽しいと思うか」の評価結果を示す。通常折り紙の平均スコアは3.65(小数点第3位四捨五入)、AR折り紙の平均スコアは4.68であった。通常折り紙とAR折り紙の平均点の差が統計的に有意かを確かめるために、有意水準1%で両側検定のt検定を行った結果、2つのスコアに有意差が得られた($t(60)=4.75$, $p < 0.01$)。有意差が得られたうえで、AR折り紙体験がより楽しいと感じる被験者が多数いたという結果が示された。肯定的な回答に関しては、現実世界の折り紙を折るという行為から仮想現実の結果に結果を及ぼすことができるという体験を画期的に感じたためであると推測する。アンケートに記載されたコメント(4.3.6)から、動きに合わせたCGの操作や、折った成果物によって変化するCGデザインを好意的に感じた被験者がいたことがわかった。また、被験者データから、ARゴーグルの使用経験がある人とない人で比較した際に、経験がない被験者の方が若干ではあるがAR折り紙体験をより楽しいと回答する傾向がみられた。AR体験

そのものに対する目新しさが影響し、楽しいと回答する可能性がある」と推察する。

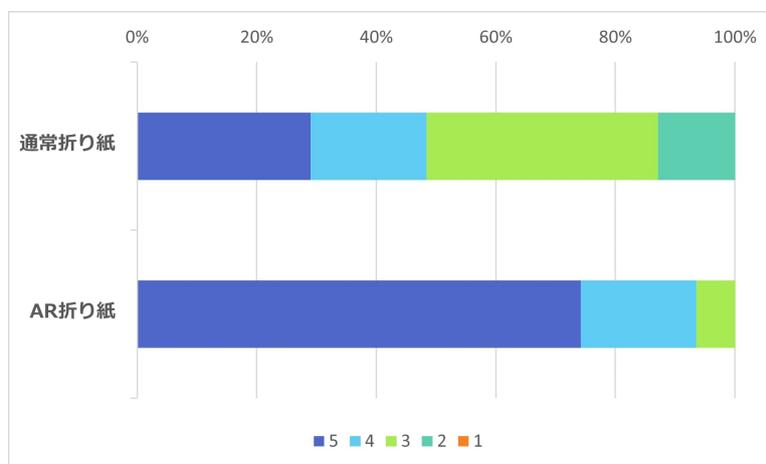


図 4.3: 「体験して楽しいと思うか」評価結果

4.3.2 体験モチベーション

図 4.4 に、「もう一度体験したいか」の評価結果を示す。通常折り紙の平均スコアは 2.94、AR 折り紙の平均スコアは 4.35 であった。平均点の差が統計的に有意かを確かめるために、有意水準 1% で両側検定の t 検定を行った結果、2 つのスコアに有意差が得られた ($t(60)=5.73, p < 0.01$)。「もう一度体験したいか」に対する評価として、「5」または「4」を回答した被験者は、通常折り紙では 32%、AR 折り紙では 90% であった。有意差が得られたうえで、通常折り紙体験に比べて、AR 折り紙体験をもう一度体験したいと感じる被験者が多数いたことが示された。この結果は、折り紙体験の拡張として仮想情報である CG の操作や、作成方法によって変化する CG デザイン等の飽きさせない工夫が評価されたと推測する。アンケートに記載されたコメントでは、折り方によって AR で再現されるオブジェクトに違いがあるために、もう一度体験したいという気持ちになる、と回答されていた。

4.3.3 体験の難しさ

図 4.5 に、「体験に難しさを感じるか」の評価結果を示す。通常折り紙の平均スコアは 2.97、AR 折り紙の平均スコアは 3.39 であった。平均点の差が統計的に有意

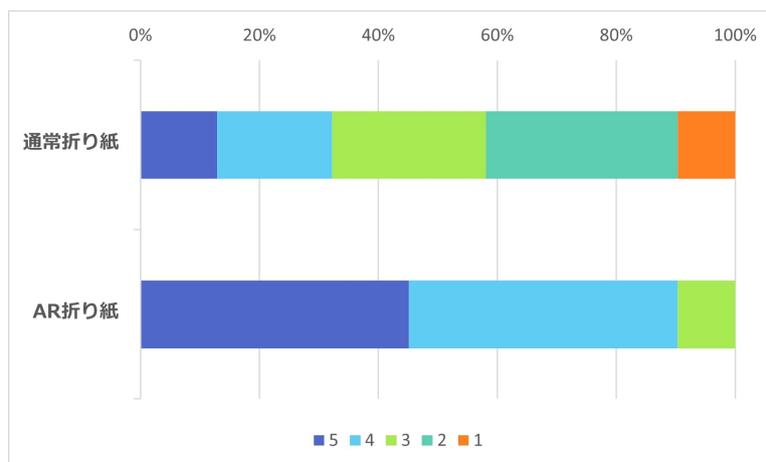


図 4.4: 「もう一度体験したいか」評価結果

かを確かめるために、有意水準 1%で両側検定の t 検定を行った結果、2つのスコアに有意差は得られなかった ($t(60)=1.89, p > 0.01$). つまり、データは同じ傾向にあり、差異が小さいことがわかる. このことから、通常折り紙と AR 折り紙体験を比較した際の難易度の変化は見受けられず、通常折り紙同様に容易に体験が可能であることが示される. 否定的な回答に関しては、実験を通して、鳥型折り紙そのものの作成手順が簡単ではなかったことが見受けられた. コメントでも、折り紙作成手順が難しく感じた、作成に補助が必要等の意見が出ていた. また、AR ゴーグルを用いた際に CG オブジェクトが正確に表示されない等の課題が影響しているのではないかと推察する.

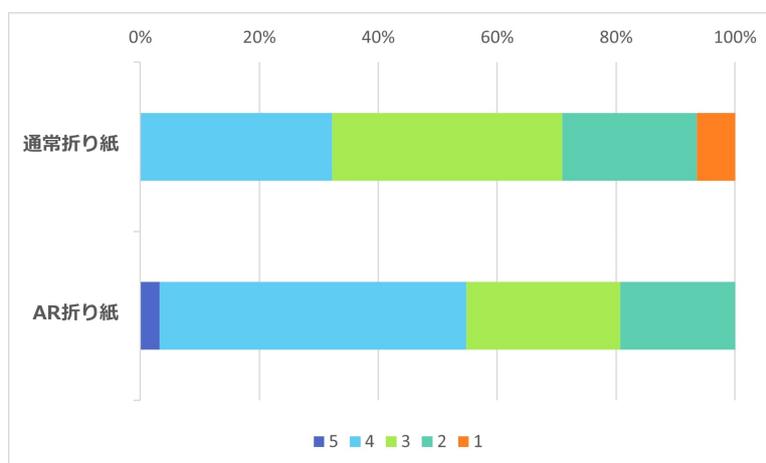


図 4.5: 「体験に難しさを感じるか」評価結果

4.3.4 体験時のストレス

図 4.6 に、「体験時にストレスを感じるか」の評価結果を示す。通常折り紙の平均スコアは 2.55，AR 折り紙の平均スコアは 2.71 であった。平均点の差が統計的に有意かを確かめるために、有意水準 1% で両側検定の t 検定を行った結果、2 つのスコアに有意差は得られなかった ($t(60)=0.62, p > 0.01$)。つまり、データは同じ傾向にあり、差異が小さいことがわかる。このことから、AR 折り紙体験は通常折り紙体験と比較して、新たにストレスを加えることはないことが示される。否定的な回答に関しては、折り紙に対して CG が安定して表示されない等の要因があると推察する。

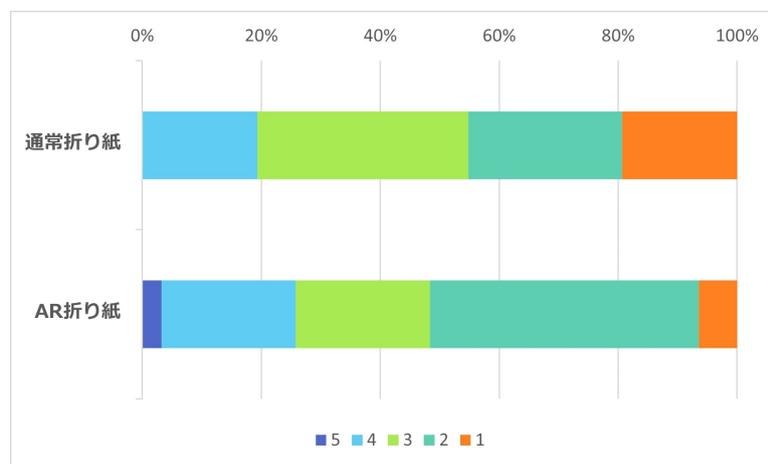


図 4.6: 「体験時にストレスを感じるか」評価結果

4.3.5 AR 折り紙のデザイン性

図 4.7 に、「折り紙用紙自体のデザインに違和感を覚えるか」の評価結果を示す。平均スコアは 2.10 であった。被験者の半数以上は折り紙に組み込まれた AR マーカであるパターンに特別違和感を覚えることは無かったことが示される。肯定的な回答に関しては、特に違和感を覚えないという意見や、QR コード等の普及によりランダム性の高いパターンが日常生活で見慣れてきたという意見が出た。否定的な回答に関しては、日常では見慣れない柄であり、モノクロの柄と裏地の白色と重なった際の表裏の違いが分かりづらく、折り目が視認しづらい等の意見が出た。

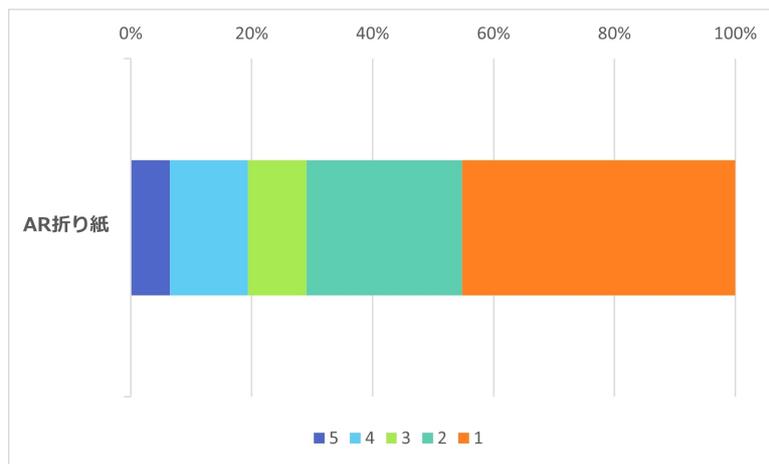


図 4.7: 「折り紙用紙自体の柄のデザインに違和感を覚えるか」評価結果

4.3.6 自由記述について

自由記述の被験者のコメントを以下に示す。(一部抜粋)

体験した感想を教えてください

- 折り紙を折るという現実世界の行為によって仮想現実の結果に影響を及ぼすことができるという体験が画期的でした。折り紙は、折り方次第で完成形が無数に存在するため、ARの可能性が大きく広がるアイデアだと感じました。
- 通常の折り紙よりも完成品への期待感があり、モチベーションが高いと思う。また、折り方によってARで再現されたものも違いがあるということからも、通常折り紙よりももう一回やりたい気持ちになれる。
- 普通の折り紙よりは遥かに面白かった。
- 折った紙が実際に映像として動くのは面白かった。
- 昔ながらの身近な折り紙で、AR体験が出来る事にとっても安価で楽しむことができることも発想が凄いと思った。
- 古典的な折り紙と最先端のARの組み合わせは面白かった。折り紙の動きに合わせてCGが動くのが面白かった。動きに応じてエフェクトも出れば面白いかもと感じた。鳥ではなく他の動物でも試してみたいと感じた。
- 複数人でやるのが、他の人の作品との違いもあってより楽しいと思いました。
- 折り紙がVRで体験できて、普通の折り形より新鮮感とか面白さとかが強い感じてできる。
- とても楽しい経験になった。折った成果物によって表情が変わる点がとても楽しい。
- 出来上がった時にARキャラクターを見れるため、それを楽しみにしながら折ることができた。

- 現実世界で自分が作った物が拡張現実世界では別の形として見れるのは面白い体験だった。
- 折り方によって鳥の表情が変わるのが面白かった。また体験したいと思った。

体験時に気になったことがあれば教えてください

- 折り紙を折ることが難しく感じました。多分、簡単な折り紙でもやるのが可能だと思うので、小学生でも楽しめそうだと思います。
- 折り方が少し難しい。補助の人がいないとわからない。
- 読み取り精度は難しいですが、表示される座標の問題はなんとかできそうかな？と思いました。
- マーカーの読み込みがうまくいかない場合もあった。
- グレー以外の折り紙はどうなるのか。
- 3DCG 分野に少しでも知見があると、ある程度うまく体験できるが、知見がないと、少し難しいと感じた。
- カラスを折ったのにどうしてニワトリが表示されるのか。他の人が作ったニワトリとバトルさせたい。うまく作れた方が勝つ、とか。

折り紙用紙自体の柄のデザインに違和感を覚える理由があれば教えてください

- 日常生活では見慣れない柄であり、よく目にする無地の折り紙と比べて違和感を覚えました。また、モノクロの柄に裏地が白色であるため、カラフルな無地の折り紙に比べて、折っている最中に表裏の違いが分かりづらく感じました。
- 柄を気にしない(折ることで出来るものの方が気になる)から。

- 違和感ほどではないが、折り目やや視認しにくい時がある。
- そこまで違和感を覚えなかった。
- 普段見ない柄だから違和感を覚えやすいと思った。
- 複雑な柄の折り紙を今までに使用したことがあるため。
- QRコードが普及しており、違和感は覚えない。

4.4 評価結果のまとめ

評価の結果、本システムによる折り紙体験の拡張として、楽しさ、体験モチベーションは高評価であることが確かめられた。

項目1に関しては、通常の折り紙体験に対して、有意差を得たうえで、より楽しいという評価を得られた。項目2に関しては、通常の折り紙体験に対して、有意差を得たうえで、90%の被験者がもう一度体験したいと評価しており、体験モチベーションが大幅に向上したことが示された。現実世界の折り紙を折るという行為から仮想現実の結果に結果を及ぼすことができるという体験、動きに合わせたCGの操作、折った成果物によって変化するCGデザイン等のインタラクションに対する満足度が高いことが確かめられた。

項目3に関しては、体験の難しさとして通常折り紙と大きな差異はないことが示された。また、項目4に関しても、体験時によるストレスとして通常折り紙体験と大きな差はないことが示された。難しさやストレスを感じる要因として、本システムで導入した鳥型折り紙の作成手順が容易ではなかったことがあると推測される。作成手順をイラストと文章で表していたが、折り紙は3次元的な操作を必要とするために、映像やアニメーション等で説明することで理解しやすくなり、作成手順に関する課題を解決することができるのではないかと推察する。否定的な意見として、ARマーカの認識精度及び重畳表示の安定性が挙げられていた。本システムは3.5節で示したように、折り紙に組み込まれたARマーカを認識することで重畳表示を可能としており、あらかじめ格納されている基準のARマーカを

認識する必要がある。しかし、乱雑に折り紙を作成した場合に、基準の AR マーカから明らかに逸脱してしまい、認識精度が大幅に低下してしまう。そういった課題に対し、「丁寧に折らなければシステムを体験できない」というゲーム性が生じ、折り紙をより正確に折るように促す効果が見受けられた。完成形の折り紙の精工度合いによって重畳表示される CG に変化が起これば、正確な折り紙作成へのモチベーション向上につながると考える。加えて、認識精度は背景による外乱に影響するので、無地背景の環境下で実験を行うことで認識精度が向上すると示唆される。

項目5に関しては、被験者の半数以上は折り紙に組み込まれた AR マーカであるパターンに特別違和感を覚えることは無かったことが示された。これにより、周囲の景観に合わせた自然な AR マーカのデザインとして、折り紙を通じて拡張現実感をより自然に楽しめるシステムを構築することが示された。否定的な回答として、白黒模様のデザインが裏地の白色と重なり、表裏の違いが分かりづらく、折り目が視認しづらいというものがあった。そういった課題に対し、裏地にカラー無地を組み込むことで折り目が明瞭になるのではないかと推察する。

4.5 期待される応用例

本システムを用いることで考えられる応用例を述べる。提案手法の利点として、簡易的な道具のみで体験が可能、自ら作成する創造性を活かした AR 体験、仮想情報とインタラクション、AR による拡張性の高さ等が挙げられる。

1章で述べたように、教育分野では折り紙は手先を使い多様な形状を創作する特性から幼児の脳の活性に効果があるとされている。また、福祉分野では運動効果と精神的効果の両方が期待され、手先の訓練や身体機能の維持、カウンセリング等に取り入れられている。折り紙体験拡張及びモチベーション向上、体験に伴う精神・身体的負担の低さから教育分野、医療分野への活用が可能である。例えば、折り紙を折りこむことで変化する可視面の面積を AR 表示でガイドすることで、教育の身体的動作及び視覚的情報を兼ねた学習による興味関心の向上や理解促進につながる。乳原ら [37] の寂しさ解消ロボットの研究から、仮想の動物やキャラク

タとの触覚的動作を伴うインタラクションを行うことで、寂しさやストレスの解消、癒し等のセラピー分野にも応用が可能である。

また、AR マーカが組み込まれた折り紙用紙を印刷すれば体験が可能という導入コストの低さから、多人数集まるイベントやコンサート等のエンタメ領域での活用や、マーケティング広告への活用も可能である。例えば、全体が印刷された安価で使い捨てのリサイクル可能な入力デバイスとして、商品カタログに AR マーカを組み込んだ商品を模したペーパークラフトを織り込む。そして、ユーザは作成したペーパークラフトを通じて商品を手取るように閲覧することが可能となる。

第5章 まとめ・今後の課題

5.1 まとめ

本稿では、AR技術を用いた折り紙の体験拡張システムを開発した。現実世界で作成した折り紙にデジタル情報を付加し、ARでの拡張演出(CGオブジェクトの重畳表示)及び3次元形状の折り紙の形状認識を利用したユーザとのインタラクションを構築した。安定した重畳表示精度を確保するために、折り紙用紙へのARマーカの最適な組み込み方法を模索し、ランダム性の高いパターンをARマーカとして採用した。折り紙に組み込まれた複数のARマーカのパターンを活用し、多面的な折り紙の形状認識を行うことに成功した。切り分けられた複数のマーカの認識の可否、マーカごとの座標及び角度検出によって折り紙の細かな形状認識を行い、形状変化によるCGへのインタラクションを可能とした。また、折り用紙紙全体にARマーカを組みこむことで、ユーザの折り紙の折り方によって完成形のARマーカのパターンが変化する特徴を活かし、作成者によってAR表示されるCGが変化する機能を搭載した。

評価実験では、31名の被験者に実験を行ってもらい、5段階評価を用いたアンケート調査を行った。結果から本システムを体験した多くの人々から楽しさの向上が確認された。通常折り紙と比較し、有意差を得たうえで、90%の被験者がもう一度体験したいと評価しており、体験モチベーションが大幅に向上したことが示された。現実世界の折り紙を折るという行為から仮想現実の結果に結果を及ぼすことができるという体験、動きに合わせたCGの操作、折った成果物によって変化するCGデザイン等のインタラクションに対する満足度が高いことが確かめられた。また、体験の難しさと体験時によるストレス度は通常折り紙と大きな差異はないことが示された。さらに、周囲の景観に合わせた自然なARマーカのデザ

インとして、折り紙を通じて拡張現実感をより自然に楽しめるシステムを構築することが示された。

提案手法の利点として、簡易的な道具のみで体験が可能、自ら作成する創造性を活かしたAR体験、仮想情報とインタラクション、ARによる拡張性の高さ等が挙げられ、教育、セラピー、エンタメ、マーケティング等に活用できることが示唆された。

5.2 制限

本システムには2つの制限がある。1つ目の制限は、認識範囲の制限である。AR折り紙の形状認識は、ARグラス搭載のRGBカメラを用いているが、ARマーカが完全に手で隠れてしまう場合や、カメラに対して折り紙の紙面が鋭角に位置する場合のマーカ追従には限界がある。この課題に対して、ARマーカサイズの拡大や、立方体等の膨らみのある形状の3次元折り紙に限定する等の解決案がある。また、マーカが手に覆い隠された場合でも認識を可能とするために、手首に筋電センサを取り付けることで折り紙に対する繊細な操作を補完することが可能であると推察する。

2つ目の制限は、ユーザの操作によるCGの形状変化の処理が折り紙形状によって異なる点である。本システムではランダム性の高いパターンが組み込まれた折り紙の織り成す形状からARマーカを切り出しているが、作成する折り紙の形状によってARマーカの切り取り及び動作に伴う制御手法を選定しなければならない。多様な形状に対しても簡易的に実装を可能とするために、代表的な折り紙形状に対する実装を検討し、汎用性を高くする必要がある。

5.3 今後の課題

本研究における安定した重畳表示精度を確保するために、折り紙用紙へのARマーカのより最適な組み込み方法の検証を行う。また、ARグラス搭載のセンサ(RGBカメラ+深度計測センサ)を用いてユーザのハンドトラッキングを行い、折

り紙に対するより詳細な操作(指で触れる・つまむ等)に対応し、より多様なインタラクションを可能にしていく。さらに、今回プロトタイプとして作成した鳥型折り紙に限らず、動作に伴う操作が可能な折り紙(飛び跳ねるカエル、口をパクパクさせるキツネ等)へのシステムを導入し、作成が簡単なものから複雑なものまで作れるようにすることで、折り紙経験に関わらず体験が可能で、より継続的に楽しめるシステムへと改良していく。

今回、評価実験として学生を中心に体験してもらったが、研究の応用性を探るために、幼児や高齢者に体験してもらい、システムのどのような点に楽しさや難しさを感じるかを検証する必要がある。そして、折り紙操作による視覚的变化に限らず、CGの動きに合わせて効果音(鳴き声、環境音等)を鳴らす等の聴覚情報を加えることで、仮想情報と実空間とのよりシームレスなインタラクションを可能とするためのARシステムの開発を目指す。

謝辞

はじめに、本研究を進めるにあたり、的確且つ温かいご指導とご鞭撻、激励を賜りました宮田一乗先生に深く御礼を申し上げます。宮田一乗先生には、本学に入学前から研究についてご指導いただき、入学後には先生からの助言もあり、入学時の成績優秀者一名に与えられる特別奨学金の獲得に挑戦し、結果として代表一名に選出されることができました。また、グループ研究での国際学会発表や、学内外の学生との交流、留学生のサポート、スタートアップ企業訪問等様々な貴重な体験をすることができました。重ねて御礼申し上げます。

謝浩然先生におかれましては、本研究を進めるにあたり、様々なアドバイスやヒントを受け賜りました。国際的トップジャーナルの文献や、最新技術に関する情報のご提供、国際学会発表における論文の添削、何より本研究で使用する HoloLens2 を提供していただき、心から感謝申し上げます。

吉田匠吾さん、彭以さん、日比野友博さん、神田純哉さん、谷上明日華さん、He Yi さん、金山春香さん、Zhang Tianyu さんには、研究の方向性や課題、生活面においても様々な助言を頂戴しました。厚く御礼を申し上げ、心より感謝の念を表します。

大森和くん、沖野浩太郎くん、滝上亮太くん、舟橋克樹くん、岸田和太くん、LIU Zhe くんとは、長きにわたって研究および生活を共にしました。切磋琢磨し合い、陰に陽に闘ってきた日々は私にとってかけがえのない思い出です。大変お世話になりました。心より感謝を申し上げます。

研究室の皆様、多くの友人たちにも大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。そして、遠く離れた地より、いつも応援してくださっている家族の存在は私にとって何にも増して大きな心の支えとなりました。心より感謝申し上げます。これからも報恩感謝を胸に、英知を磨き続け、社会に貢献して参ります。

参考文献

- [1] 長谷川和恵, 吉田稔. 教材としての折り紙のもつ教育的価値について, 信州大学教育学部紀要, vol.112, pp.25-32 (2004)
- [2] 坪井俊. 折り紙を教材とする大学初年次数理科学教育の提案. 武蔵野大学数理工学センター紀要= The bulletin of Musashino University Musashino Center of Mathematical Engineering 6, 49-60, (2021)
- [3] 野田さとみ, and 佐久間春夫. 「あやとり」「折り紙」の学習過程における脳波及び心理的变化. バイオフィードバック研究 37.1, 29-36, (2010)
- [4] 荒井聖貴. 軽度から重度の認知機能障害者が一緒に参加できるプログラム-理学療法の知見と折り紙を用いた実践報告. 関東甲信越ブロック理学療法士学会 第 38 回関東甲信越ブロック理学療法士学会. 社団法人 日本理学療法士協会 関東甲信越ブロック協議会, (2020)
- [5] Ohyori, Masanobu, et al. Perceptual Control of Food Taste with Projection Mapping. 2022 Nicograph International (NicoInt). IEEE, (2022)
- [6] 吉田匠吾, 謝浩然, and 宮田一乗. 空気圧アクチュエータを用いた全周囲圧力提示システム NaviChoker の開発. インタラクション, (2021)
- [7] 絶滅危惧オリガミ, <https://endangered-origami.com/>, (last accessed in 2023/1/9).
- [8] クラフトフレンズ パピるんず, <https://toy.bandai.co.jp/series/papyruns/>, (last accessed in 2023/1/9).

- [9] 永井淳之介, et al. TSUMIKI CASTLE: 積み木を用いたインタラクティブな VR システム. 芸術科学会論文誌, vol.13, pp.67-75 (2014)
- [10] 岩月正見, et al. モバイル型 AR 積木アプリケーション, エンタテインメント コンピューティングシンポジウム 2015 論文集, pp.85-90 (2015)
- [11] 福山裕幸, 飯田勝吉, and 高井昌彰. 仮想と現実の相互作用を実現する AR 紙相撲対戦システム. 研究報告エンタテインメントコンピューティング (EC) 2018.4, 1-5 (2018)
- [12] 藪博史, et al. 変位情報を用いた VR アプリケーションの実装-バーチャル紙相撲 “トントン”. 芸術科学会論文誌 4.2, 36-46 (2005)
- [13] 小澤祐樹, 蓬萊尚幸. 拡張現実感技術を用いた折り紙作業支援システムの開発, 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.19, pp.1-4 (2018)
- [14] Song, Yingjie, et al. Mixed reality storytelling environments based on tangible user interface: Take origami as an example. 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). IEEE, (2019)
- [15] 林泰子, 筧康明, 苗村健. おりがみらいふ: 折り紙のデジタルな演出の提案, 情報処理学会 50 周年記念全国大会, 第 72 回, (2010)
- [16] Grandhi, Uttam, and Ina Yosun Chang. PlayGAMI: augmented reality origami creativity platform. ACM SIGGRAPH 2019 Appy Hour. pp.1-2, (2019)
- [17] Meta Quest2, <https://www.meta.com/jp/quest/products/quest-2/>, (last accessed in 2023/1/12).
- [18] HaptX Gloves G1, <https://g1.haptx.com/learnabout>, (last accessed in 2023/1/12).

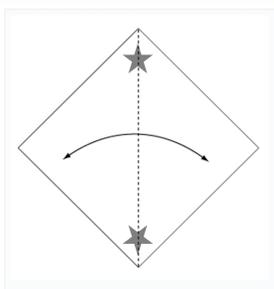
- [19] Magic Leap 1, <https://resources.magicleap.com/ja-jp/magic-leap-1>, (last accessed in 2023/1/20).
- [20] Ultraleap, Leap Motion Controller, <https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller/>, (last accessed in 2023/1/20).
- [21] Lee, Taehee, and Tobias Hollerer. Handy AR: Markerless inspection of augmented reality objects using fingertip tracking. 2007 11th IEEE International Symposium on Wearable Computers. IEEE, (2007)
- [22] Reactable, <http://reactable.com/>, (last accessed in 2023/1/20).
- [23] Henderson, Steven J., and Steven Feiner. Opportunistic controls: leveraging natural affordances as tangible user interfaces for augmented reality. Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology, (2008)
- [24] Drogemuller, Adam, et al. Turning everyday objects into passive tangible controllers. Proceedings of the Fifteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction, (2021)
- [25] 富田遼大, et al. シリアスゲーム向け箱型タンジブルユーザインタフェースの開発. 第 78 回全国大会講演論文集 2016.1, pp.741-742 (2016)
- [26] 阿部秀之, and 金丸隆志. タンジブルユーザインタフェースを用いた情報提示可能な作業機の開発. 年次大会 2016. 一般社団法人 日本機械学会, (2016)
- [27] HoloLens2, <https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens/hardware>, (last accessed in 2023/1/14).
- [28] Vuforia Developer Library, Image Targets, Developer Portal, <https://library.vuforia.com/features/images/image-targets.ht>

- [29] 窪田諭, and 中村吉孝. AR マーカと QR コードを用いた道路点検支援システムの開発と評価. 土木学会論文集 F3 (土木情報学), vol.71.2, pp.42-49 (2015)
- [30] 河出弘志, et al. 現実物体と仮想物体のインタラクションを考慮した AR に基づく情報提示装置の開発 (ITS 画像処理, 映像メディア, 視覚及び一般). 映像情報メディア学会技術報告 35.9. 一般社団法人 映像情報メディア学会, (2011)
- [31] 水地良明. ホモグラフィに着目した画像特徴点に基づく位置・姿勢のマーカレス計測に関する研究. (2016)
- [32] Nreal, NRSDK User Guide, <https://nreal.gitbook.io/nrsdk/development/image-tracking>, (last accessed in 2023/1/14).
- [33] iStock, ランダムシームレスモノクロモザイクパターン, <https://www.istockphoto.com/jp/>, (last accessed in 2023/1/14).
- [34] 折り紙 JAPAN, 口がパクパク動く!おしゃべりカラス《折り紙》折り方・作り方, <https://origamijapan.net/jp/talking-crow/>, (last accessed in 2023/1/14).
- [35] BitGem, Cube World Rooster Rudy - Proto Series, <https://assetstore.unity.com/packages/3d/characters/animals/birds/cube-world-rooster-rudy-proto-series-121331>, (last accessed in 2023/1/14).
- [36] 芳賀繁, and 水上直樹. 日本語版 NASA - TLX によるメンタルワークロード測定 各種室内実験課題の困難度に対するワークロード得点の感度. 人間工学, vol.32.2, pp.71-79 (1996)
- [37] 乳原梓, and 上田博唯. 寂しさ解消ロボットの提案. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2013 論文集 2013, pp.36-40, (2013)

付録

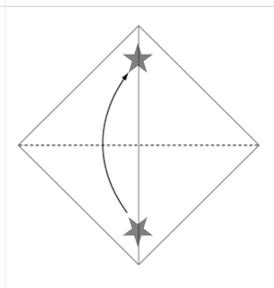
実験に使用した折り紙作成手順書

口がパクパク動く！おしゃべりカラス <<折り紙>> 折り方・作り方

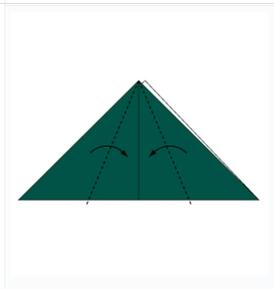


Step 1
矢印の方向に折り、折り目をつけます。

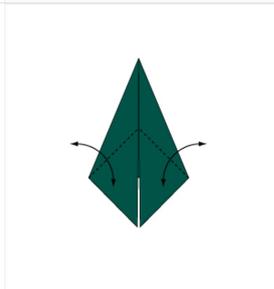
※AR折り紙の場合は★マークを目印に
向きを合わせてください。



Step 2
点線で 矢印の方向に折ります。



Step 3
点線で 矢印の方向に折ります。



Step 4
点線で 矢印の方向に折ります。

(a)Page1

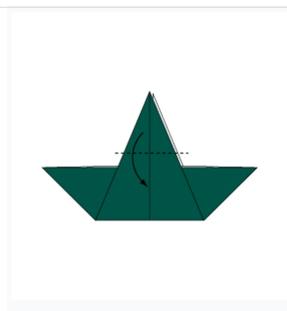
<https://origamijapan.net/jp/talking-crow/> を基に作成



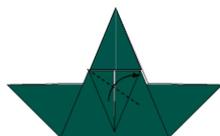
Step 5
中の一枚を外側に出します。



Step 6
裏地の白色が隠れるように
裏返して折ります。



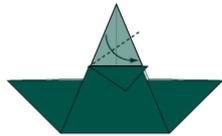
Step 7
点線で矢印の方向に折ります。



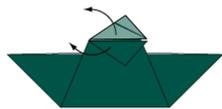
Step 8
点線で矢印の方向に折ります。

(b)Page2

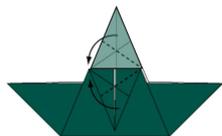
<https://origamijapan.net/jp/talking-crow/> を基に作成



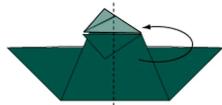
Step 9
点線で矢印の方向に折ります。



Step 10
矢印の方向に戻します。



Step 11
点線で矢印の方向に折ります。



Step 12
点線でうしろに折ります。



Step 13

くちばしの先端を外側に引っ張り
折り目をつける。

羽を左右に広げると口が開いたり
閉じたりします。

日本の伝統な折り紙100選 - 簡単に作れる100種類折り紙JAPAN「口がバクバク動く! おしゃべり カラス 《折り紙》 折り方・作り方」を参考に作成
<https://origamijapan.net/jp/talking-crow/>

(d)Page4

<https://origamijapan.net/jp/talking-crow/> を基に作成

図 5.1: 実験に使用した折り紙作成手順書

アンケート項目



折り紙を用いたインタラクティブなARシステムの開発

今回は、実験にご協力頂きありがとうございます。
これから、2つの体験(通常折り紙とAR折り紙)の感想及び評価をしていただきます。
実験責任者：北陸先端科学技術大学院大学 高田研究室 修士2年 大依正直

名前*

回答を入力

メールアドレス*

回答を入力

年齢*

選択

折り紙の経験があるかどうか*

1 2 3 4 5

全くそう思わない とてもそう思う

ものづくりの経験があるかどうか*

1 2 3 4 5

全くそう思わない とてもそう思う

ARグラスの使用経験があるかどうか*

ない

ある

研究に関する承諾*

個人情報及び回答結果は匿名で使用いたします。研究結果として承諾するか否か
をチェックしてください。

研究材料として回答を使用することを、

「承諾する」

「承諾しない」

次へ

1/7 ページ

フォームをクリア

Google フォームでパスワードを記憶しないでください。

このコンテンツは Google が作成または承認したものではありません。 不正行為の報告・利用規約・プライバシーポリシー

Google フォーム

(a)Page1



折り紙を用いたインタラクティブなARシステムの開発

体験して楽しいと思うか

通常折り紙*

1 2 3 4 5

全くそう思わない とてもそう思う

AR折り紙*

1 2 3 4 5

全くそう思わない とてもそう思う

戻る 次へ 2/7 ページ [フォームをクリア](#)

Google フォームでパスワードを記憶しないでください。
このコンテンツは Google が作成または承認したものではありません。 [不正行為の報告](#)・[利用規約](#)・[プライバシーポリシー](#)

Google フォーム

(b)Page2



折り紙を用いたインタラクティブなARシステムの開発

もう一度体験したいか

通常折り紙*

1 2 3 4 5

全くそう思わない とてもそう思う

AR折り紙*

1 2 3 4 5

全くそう思わない とてもそう思う

戻る 次へ 3/7 ページ [フォームをクリア](#)

Google フォームでパスワードを記憶しないでください。
このコンテンツは Google が作成または承認したものではありません。 [不正行為の報告](#)・[利用規約](#)・[プライバシーポリシー](#)

Google フォーム

(c)Page3



折り紙を用いたインタラクティブなARシステムの開発

体験に難しさを感じるか

通常折り紙*

1 2 3 4 5

全くそう思わない とてもそう思う

AR折り紙*

1 2 3 4 5

全くそう思わない とてもそう思う

戻る 次へ 4/7 ページ [フォームをクリア](#)

Google フォームでパスワードを記憶しないでください。
このコンテンツは Google が作成または承認したものではありません。不正行為の報告・利用規約・プライバシーポリシー

Google フォーム

(d)Page4



折り紙を用いたインタラクティブなARシステムの開発

体験時にストレスを感じるか

通常折り紙*

1 2 3 4 5

全くそう思わない とてもそう思う

AR折り紙*

1 2 3 4 5

全くそう思わない とてもそう思う

戻る 次へ 5/7 ページ [フォームをクリア](#)

Google フォームでパスワードを記憶しないでください。
このコンテンツは Google が作成または承認したものではありません。不正行為の報告・利用規約・プライバシーポリシー

Google フォーム

(e)Page5



折り紙を用いたインタラクティブなARシステムの開発

折り紙用紙自体の柄のデザインに違和感を感じるか

AR折り紙*

1 2 3 4 5

全くそう思わない とてもそう思う

違和感を感じる理由があれば教えてください (任意)

回答を入力

戻る 次へ 6/7 ページ フォームをクリア

Google フォームでパスワードを記憶しないでください。
このコンテンツは Google が作成または承認したものではありません。不正行為の報告・利用規約・プライバシーポリシー

Google フォーム

(f)Page6



折り紙を用いたインタラクティブなARシステムの開発

感想(フィードバック)

体験した感想を教えてください*

回答を入力

体験時に気になったことがあれば教えてください

回答を入力

戻る 送信 7/7 ページ フォームをクリア

Google フォームでパスワードを記憶しないでください。
このコンテンツは Google が作成または承認したものではありません。不正行為の報告・利用規約・プライバシーポリシー

Google フォーム

(g)Page7

図 5.2: GoogleForm 上のアンケート