JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

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；謝，浩然；宮田，一乗
Citation	情報処理学会研究報告．HCI，ヒューマンコンピュータインタラクション，2023-HCI-202(33)：1-8
Issue Date	2023-03-06
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/18201
Rights	社団法人 情報処理学会，大依正宣，謝浩然，宮田一乗，情報処理学会研究報告．HCI，ヒューマンコンピュータインタラクション，2023-HCI-202(33)，2023，1-8．ここに掲載した著作物の利用に関する注意 本著作物の著作権は情報処理学会に帰属します。本著作物は著作権者である情報処理学会の許可のもとに掲載するものです。ご利用に当たっては「著作権法」ならびに「情報処理学会倫理綱領」に従うことをお願いいたします。Notice for the use of this material: The copyright of this material is retained by the Information Processing Society of Japan (IPSJ). This material is published on this web site with the agreement of the author (s) and the IPSJ. Please be complied with Copyright Law of Japan and the Code of Ethics of the IPSJ if any users wish to reproduce, make derivative work, distribute or make available to the public any part or whole thereof. All Rights Reserved, Copyright (C) Information Processing Society of Japan.
Description	

JAIST
JAPAN ADVANCED INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

Vol.2023-HCI-202 No.33
2023/3/14

AR 技術を用いた折り紙の体験拡張システム

大依 正宣[1,a)]　謝 浩然[1]　宮田 一乗[1]

概要：本論文では，AR 技術を用いた折り紙の体験拡張システムについて述べる．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を提案した．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．本研究は，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 CG 表示による拡張演出及び 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．評価実験を行い，その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拡張及び折り紙体験のモチベーション向上が確認された．

キーワード：AR，折り紙，体験拡張，タンジブルユーザインタフェース

Augmenting Origami User Experience using AR Technology

Abstract: This paper describes an augmenting origami user experience using AR technology. 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 work 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. 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.

Keywords: AR, origami, augmented experience, tangible user interface

1. 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，現実世界と仮想世界を融合させ，相互にリアルタイムで影響しあう空間を構築する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]．こうしたサービスでは，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

1　北陸先端科学技術大学院大学
a)　s2110036@jaist.ac.jp

ⓒ2023 Information Processing Society of Japan

る映像や 3D アニメーションが投影される．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コンピュータグラフィックス (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，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，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．

2. 関連研究

現在，折り紙の折り方を支援する方法として AR 技術を用いた研究が進められている [8]．Song ら [8] 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．この提案では Microsoft 社の HoloLens と Kinect カメラによるハンドトラッキングを組み合わせて拡張演出を施している．しかし，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．

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 [9][11]．林ら [9] 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．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，中里ら [10] は多く利用されている QR コードの様に白黒で無機質な AR マーカは実環境の景観を損ねる問題があると主張している．その課題に対して，林ら [9] は周囲の景観に合わせた自然な AR マーカのデザイン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．

Grandhi ら [11] による提案では折り紙体験のたのしさの拡張として，ユーザがデザインし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．折り紙用紙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．

3. 提案手法

3.1 システム概要

本システムの体験イメージを図 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，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，AR 表示される CG が変化する機能を搭載した．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体験を提供することができる．

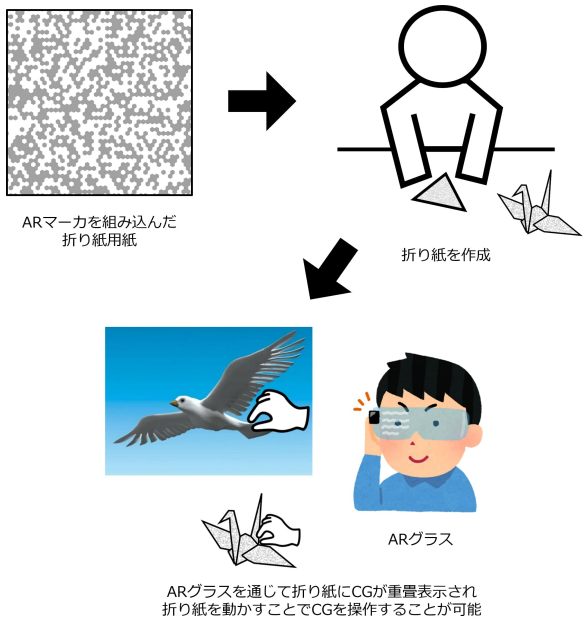


図 1 体験イメージ
https://www.cadnav.com/3d-models/model-42207.html を基に作成

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 社の HoloLens2 を採用する．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 [12]．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．

3.3 システムフロー

本システムフローを図 2 に，システム構成図を図 3 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．これらの処理をリアルタイム (60fps) に繰り返し行う．

3.4 折り紙への最適なマーカ組み込みの検証

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，

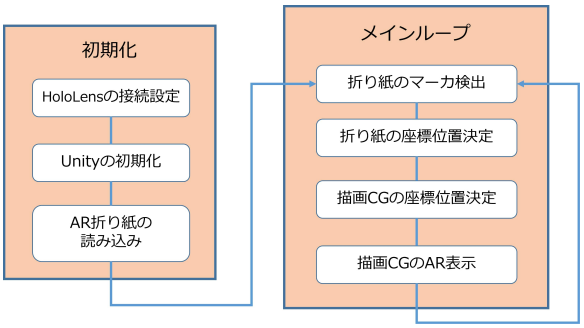


図 2 システムフロー

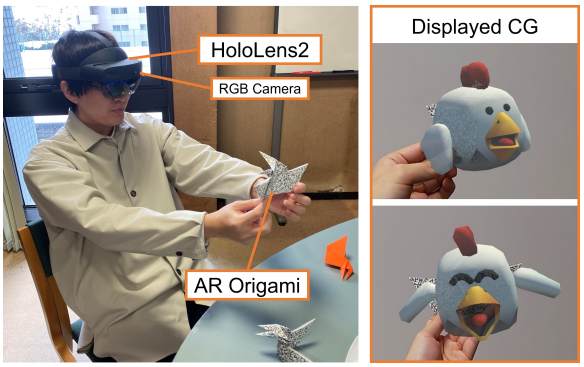


図 3 システム構成図

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とマーカレス型があり，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[13] 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．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[14] から幾何学デザインを参照し，図 4 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

ⓒ2023 Information Processing Society of Japan

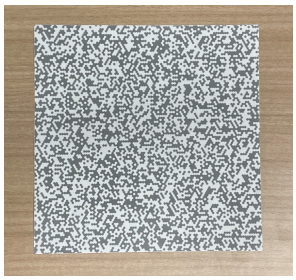


図 4 AR マーカを組み込んだ折り紙
https://www.istockphoto.com/jp/ を基に作成

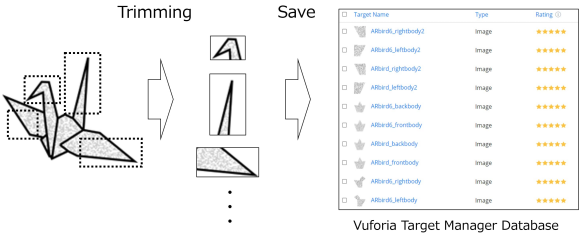


図 5 複数 AR マーカの切り取り及びデータベースへの格納

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 5 に示すように，事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あるいはデジタルカメラ等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．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 6 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 節で示す実験では，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 7 に示す．作成手順に関しては折り紙 JAPAN[15] 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出来る．

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切り分け (図 8)，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．

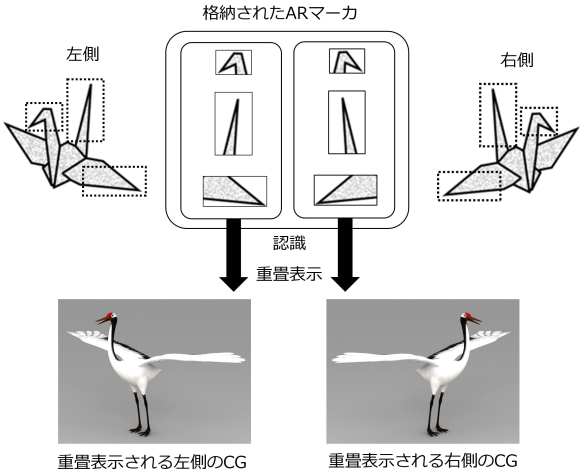


図 6 複数マーカのグループ分け及び認識による分岐処理
https://done3d.com/red-crowned-crane/ を基に作成

図 7 AR マーカが組み込まれた鳥型折り紙

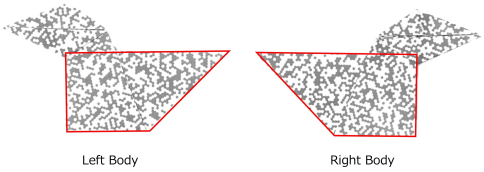
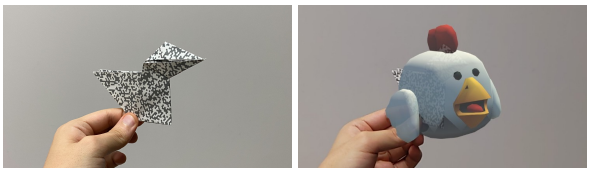


図 8 切り分けられた AR マーカ

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[16] が提供する鳥型 3D オブジェクトを利用した．図 9 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 10 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 11 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



(a) 処理前の AR 折り紙　(b)HoloLens 上での処理後

図 9　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

図 10　複数の AR マーカを認識した際の重畳表示の様子

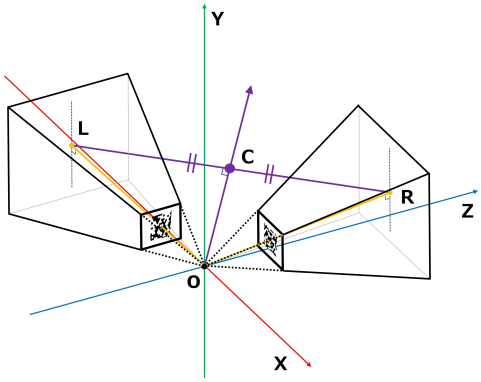


図 11　2 つの AR マーカからなる中央方向視点の求め方

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．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．

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，Vuforia に特徴点を格納している．そこで，切り分けられ，グループ分けされた複数のマーカの認識の可否による折り紙の方向及び形状の識別，マーカごとの座標及び角度検出による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．

本稿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，Vuforia によって獲得される AR マーカ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．2 点間の距離は，図 11 における LR を示している．そして，図 12 の上部に示されるように，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 13 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口ばしが同様に開いている．図 12 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．

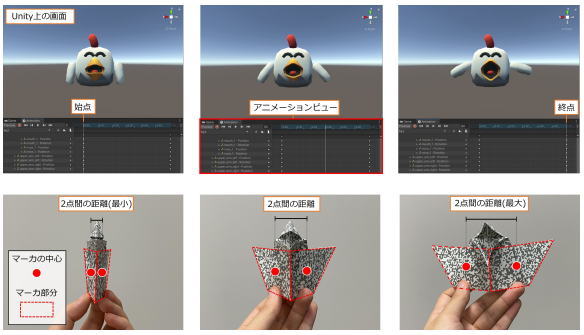
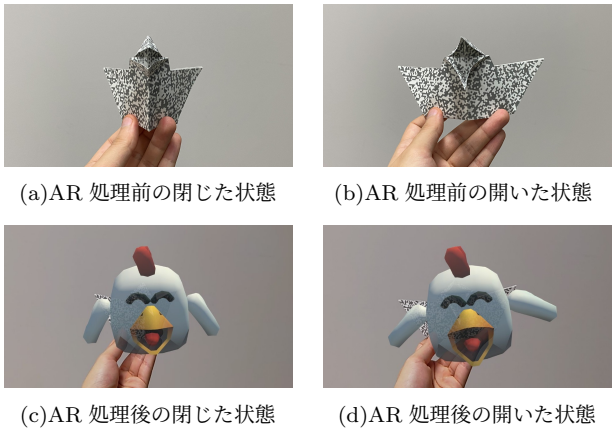


図 12　2 点間の距離に応じたアニメーションの変化



(a)AR 処理前の閉じた状態　(b)AR 処理前の開いた状態

(c)AR 処理後の閉じた状態　(d)AR 処理後の開いた状態

図 13　折り紙の開閉に応じた CG の変化

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．

ⓒ2023 Information Processing Society of Japan

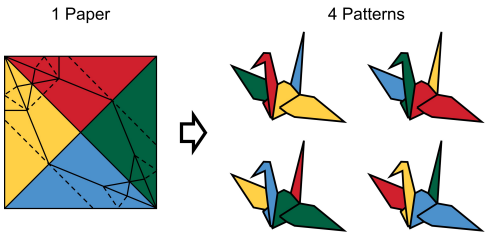


図 14 折る向きで変化する完成形の AR マーカのイメージ

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，AR 表示される CG が変化する機能を搭載した．図 4 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 14 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 マーカごとで表示される 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 15 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 15 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 の目の形状が変更されている．図中 (a) では小さな丸，(c) ではバツ印になっている．

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体験を提供することができる．

4. 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所属大学の大学院生を中心とする 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 を操作してもらった．評価実験後，アンケート調査を行った．

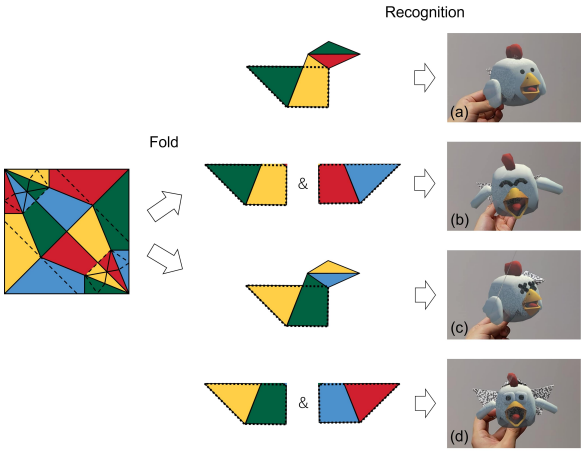


図 15 折り方の違いで変化する CG のイメージ

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，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

尚，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．

4.3 アンケート調査の結果

アンケート評価結果を図 16-19 に示す．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 16 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

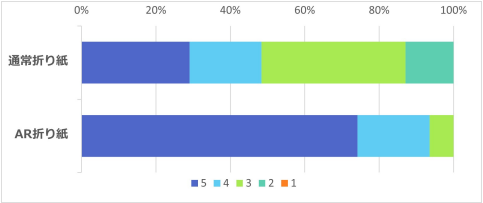


図 16 「体験して楽しいと思うか」評価結果

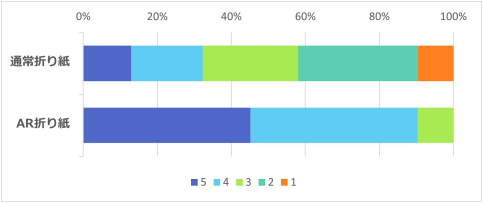


図 17 「もう一度体験したいか」評価結果

的に感じたためであると推測する．

4.3.2 体験モチベーション

図 17 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．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．アンケート結果から，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．

4.3.3 体験の難しさ

図 18 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．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．

4.3.4 体験時のストレス

図 19 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．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．

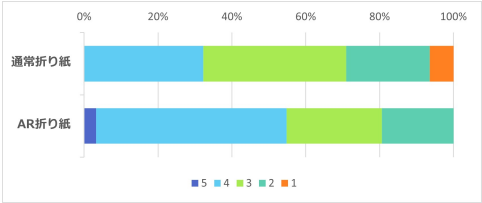


図 18 「体験に難しさを感じるか」評価結果

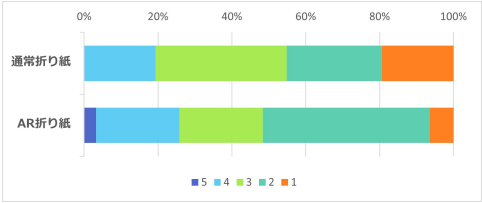


図 19 「体験時にストレスを感じるか」評価結果

4.3.5 AR 折り紙のデザイン性

「折り紙用紙自体のデザインに違和感を覚えるか」の平均スコアは 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．

4.4 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．

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．乳原ら [17] 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．

5. 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．

評価実験の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．これらの結果から，本システムはユーザの折り紙体験の楽しみを増幅させる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，福祉，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 今後の課題

本研究で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 (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，動作に伴う操作が可能な複数の折り紙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，評価実験として大学院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変化に限らず，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．

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, 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変化. 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, 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/〉(参照 2023-01-09).
[8] 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).
[9] 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).
[10] 中里祐介, 神原誠之, 横矢直和. ウェアラブル拡張現実感のための不可視マーカと赤外線カメラを用いた位置・姿勢推定 (「複合現実感 3」特集). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.10.3, pp.295-304 (2005).
[11] Grandhi, Uttam, and Ina Yosun Chang. PlayGAMI: augmented reality origami creativity platform. ACM SIGGRAPH 2019 Appy Hour. pp.1-2, (2019).
[12] Vuforia Developer Library, Image Targets, Developer Portal, 〈https://library.vuforia.com/features/images/image-targets.ht〉(参照 2023-01-09).
[13] Nreal, NRSDK User Guide,〈https://nreal.gitbook.io/nrsdk/development/image-tracking〉(参照 2023-01-14).
[14] 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/〉(参照 2023-1-14).
[15] 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/〉(参照 2023-01-14).
[16] BitGem, Cube World Rooster Rudy-Proto Series,〈https://assetstore.unity.com/packages/3d/characters/animals/birds/cube-world-rooster-rudy-proto-series-121331〉(参照 2023-01-14).
[17] 乳原梓, 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).