

2014年度 卒業論文

インタラクティブ折り紙教本システム

2015年2月16日

大阪大学 基礎工学部
システム科学科 生物工学コース
桑谷 達之

主査: _____ 日付: _____

インタラクティブ折り紙教本システム

桑谷 達之

概要

折り紙遊びは日本の伝統的な文化である。近年では、折り紙は工学の分野でも注目されており、折り紙のシミュレーションや折り紙の計測方法の研究も盛んである。一般に折り紙作品の模倣制作時には折り図が用いられる。折り図は、折り畳まれた平面の形状の折り紙を描画して、折り操作の指示を行っている。しかし、折り操作の途中で折り紙の形状を想像する必要があることから、折り紙と折り図の空間的な対応付けを理解することが難しい場合もあり、理解に経験を要する。

本研究では動画像への折り操作の重畳表示によって制作補助を行うシステムの構築を目的とする。本研究では事前に生成した折り紙の形状データと、計測した折り紙の形状を比較することで操作中の折り紙の状態の推定を行う。形状の計測においては折り紙に複数のマーカを印刷することで、折り紙の形状と位置姿勢をカメラで取得した画像から計測する。操作手順ごとの折り紙の形状データの生成にはバネ質点モデルによる物理シミュレーションを利用する。最終的に、推定された手順情報をもとに、折り操作の指示を取得した動画像に重畳提示することにより制作補助を行う。

提案したシステムの有用性を確認するために被験者実験を行った。二種類の折り紙作品に対し、従来の折り図を用いて折り紙作品を模倣制作する場合と、提案システムを用いて折り紙作品を模倣制作する場合における、完成に必要な時間と制作の失敗の回数と理由を比較した。失敗の回数と理由から、推定に誤りがなければ、二種類の折り紙作品の全ての折り操作を理解することができるということが確認された。また、一方の種類の折り紙作品では提案システムを用いることで制作時間が短縮され、提案システムの有効性が示唆された。

キーワード 折り紙, 制作補助, 三次元モデル, 画像計測, 物理シミュレーション

Interactive Origami textbook system

Tatsuyuki Kuwatani

Abstract

Origami is a Japanese traditional culture. Recently, Origami has become one of the interested topics in the engineering field, and there are many studies to simulate Origami or measure Origami. Generally, Origami illustrations are used for imitating a work of Origami. The illustrations teach the Origami imitators how to fold papers by the images that include flat appearance of Origami. Therefore, matching the illustrations with real Origami is a hard task and requires some experiences, because the imitators are need to imagine the shape of Origami between two states.

The purpose of this study is to construct the system which assists production of Origami by overlaying instructions on the captured moving image. The system estimates the state by comparing the measured with prepared shape of Origami. The system measures position and direction of Origami from the image based on printed multiple markers on Origami. The prepared shapes of Origami are calculated by using mass-spring model. Then, the system assists production of Origami by overlaying instructions on captured image based on the estimated state.

In order to evaluate the proposed textbook system, the author conducted a subjective experiment. The author prepared two types of Origami work and instructed the subjects to complete the Origami work by using the traditional illustrations and the proposed textbook. Then, the required time and the number of failure were compared between the traditional illustrations and the proposed textbook. The result showed that the required time of the proposed system was shorter than that of the illustrations for one type of the Origami works. Furthermore, the subjects could easily understand the task during the state estimations in success. Therefore, the author concludes that the proposed system is valid for navigating Origami task.

Keywords Origami, production assist, 3D model, image sensing, physical simulation

目次

第1章	はじめに	1
第2章	背景と関連研究	3
2.1	折り紙の基礎	3
2.2	ARを用いた折り紙作品制作支援	5
2.3	折り操作のシミュレーション	8
2.4	折り紙の形状の計測	10
2.5	本研究の位置づけ	12
第3章	折り紙作品の制作補助システム	13
3.1	システム概要	13
3.2	折り紙の形状情報の生成	15
3.3	折り紙の形状の計測	18
3.4	状態推定	20
3.5	折り操作の教示	23
3.6	実験における形状の評価	24
第4章	システムの実装と評価実験	25
4.1	システムに用いた機材	25
4.2	対象とした折り紙作品	26
4.3	モデルデータと状態推定	26
4.4	提案システムを用いた折り紙操作の評価	29
4.5	実験結果	33
4.6	考察	37
第5章	おわりに	38
	謝辞	39
	参考文献	40

目次

1.1	折り紙との対応付けが容易な情報の提示	1
2.1	折り図の例	5
2.2	輪郭検出を用いた折り紙作品制作支援	6
2.3	教師ビデオの重畳による折り紙作品制作支援	7
2.4	局所平坦条件	8
2.5	枚数による折り紙の厚さのモデル	9
2.6	折り操作のシミュレーション	9
2.7	輪郭計測と折り操作の推定	10
2.8	二次元バーコードによる折り紙の計測	11
3.1	支援時の処理の流れ	13
3.2	手順, 折り操作, 状態の関係	14
3.3	折り紙の生成形状の構造	15
3.4	折り紙モデルの構造	16
3.5	シミュレーションの形状データと状態毎の生成形状の関係	17
3.6	マーカの印刷位置の例	18
3.7	手順推定の処理の流れ	20
3.8	実際の折り操作教示例	23
4.1	折り紙作品の完成形状	26
4.2	「つるの基本形」の状態推定の結果と折り操作の教示	27
4.3	「家」の状態推定の結果と折り操作の教示	28
4.4	実験風景	29
4.5	「つるの基本形」の折り図	30
4.6	「家」の折り図	30
4.7	「つるの基本形」に用いた折り紙のマーカの位置	31
4.8	「家」に用いた折り紙のマーカの位置	31
4.9	実験における折り紙作品の完成形状	32
4.10	「つるの基本形」の制作時間	33

4.11 「家」の制作時間	34
4.12 「つるの基本形」の形状の誤差	34
4.13 「家」の形状の誤差	35
4.14 「つるの基本形」の失敗回数	35
4.15 「つるの基本形」の制作作品	36
4.16 「家」の制作作品	36

表 目 次

2.1	種類毎の折り紙	3
2.2	折り紙の種類	4
4.1	コンピュータの仕様	25
4.2	カメラの仕様	25

第1章 はじめに

日本の伝統的な文化は世界から注目されている。例えば、浮世絵はパリ万博を契機にジャポニズムと呼ばれる文化的な流行を生みだし、現在でも評価されている [1]。また、けん玉遊びは元々は海外の発祥でありながら、日本独自に変化し、現在では日本の文化として認識されている [2]。注目される日本の文化の一つに折り紙遊びがある [3]。折り紙遊びで制作されるような遊技折り紙は和紙の生産が盛んとなった江戸時代に発展し、近年では芸術的な作品としても評価されている [4]。一般的に他人が創作した折り紙作品の模倣制作時には、角や辺を合わせる操作の前後の折り紙の形状を一視点から描写することで、折り紙への操作を説明する折り図が用いられる。しかし、折り図は、三次元の折り操作において、折り紙が折り畳まれた、平面の形状のみを一視点から描写することが多い。したがって、折り操作の途中での折り紙の形状を想像する必要があることから、折り紙と折り図の空間的な対応付けを理解することが難しい場合もある。折り紙作品の制作の経験が乏しく折り図に慣れていない場合、折り操作の難しさよりも、折り図との対応付けが折り紙作品の制作に労力を要する原因である [5]。したがって、図 1.1 に示すような、折り操作の途中においても折り紙と提示される情報の対応付けが容易な情報の提示システムが求められている。

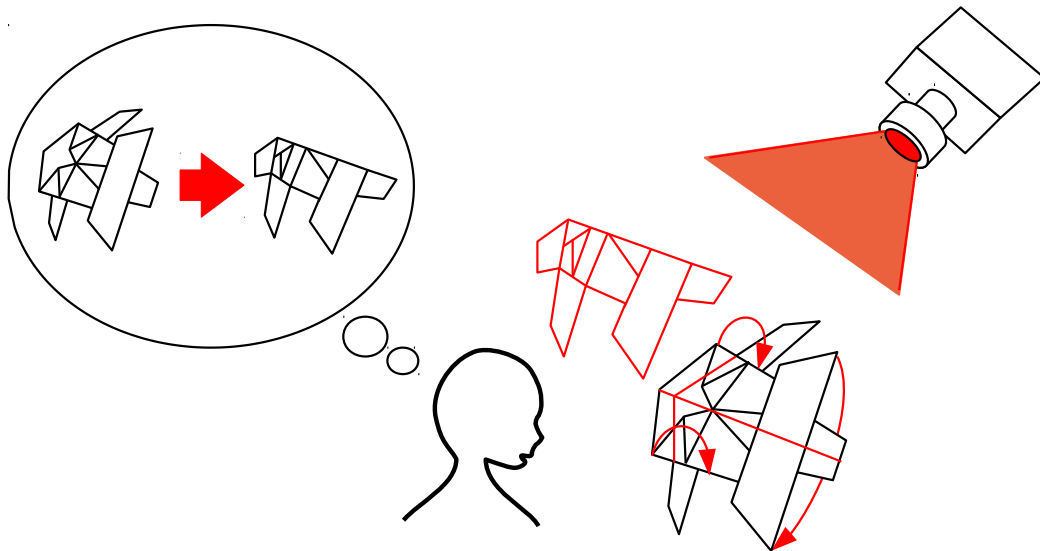


図 1.1: 折り紙との対応付けが容易な情報の提示

近年, Augmented Reality (AR) を用いた作業支援の研究が盛んであり [6] [7], AR を用いた折り紙作品の制作補助についても研究が行われている [8] [9]. AR を用いた作業支援とは, 人間が現実から五感によって得られる情報に作業の補助を行う人工的な情報を重畳して提示することで, 他の手法と比べて効率的に作業を支援する手法である. 既存の折り紙作品の制作補助手法として, 操作毎に分けられたビデオによって, 折り操作の情報を提示するシステムや, 折り紙に折り線の重畳表示を行うシステムなどが提案されている. しかし, ユーザが再生されるビデオを変更するために, 折り操作の終了の判断や折り紙と折り操作の指示との対応付けをする必要がある. または, 折り紙が平面の状態についてのみを考慮しており, 折り操作の途中など, 折り紙が立体の状態については考えられていない. したがって, 折り図と同様に, 折り操作の途中における, 折り紙との空間的な対応付けを補助していないという問題点がある. また, 折り操作の途中の状態では, 折り紙にたわみが発生することも考えられるので, 平面の状態についてのみ考慮した手法を用いることは適切ではない. したがって, 既存の制作補助手法では, 折り紙が立体の状態において, 折り紙と提示情報の対応付けが容易ではないと考える.

本研究では, 折り紙作品の模倣制作時に, 折り紙の形状に応じて操作の補助となる情報を重畳提示するシステムを構築する. 事前に折り紙の形状データを作成し, 制作中の折り紙作品を計測した形状との比較によって操作状態を推定し, 折り紙の形状に合わせた指示情報を重畳する手法を提案する. 折り紙の形状の変化について物理シミュレーションを行うことで, たわみを考慮した折り紙の形状データを生成する. また, 折り紙に印刷した複数のマーカをカメラで測定し, 取得したカメラ画像からマーカの位置と方向を計測する. マーカの計測結果を用いて推定した折り紙の形状と, 事前に生成した形状データとを比較し, 現在の折り操作を推定する. 推定した折り操作に応じて, カメラ画像中の折り紙への次の折り操作の指示の重畳表示を行い, 折り紙作品の制作を補助する. 本手法では, 立体の状態の折り紙について考慮した, 折り紙の形状データや計測手法を用いることで, 折り操作の途中のたわみが発生した折り紙に対しても, 折り操作の指示の重畳表示を行うことができる. したがって, 本システムを用いることで, ユーザが折り紙と提示情報の対応付けをする必要のない, 折り操作の教示が可能となる. 本手法の汎用性を高めることで, 商品の包装や衣服の折畳みなど, 紙や布を変形させる操作の教示が可能となると考えられる.

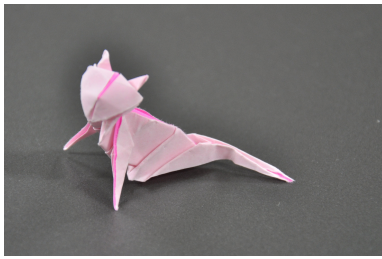

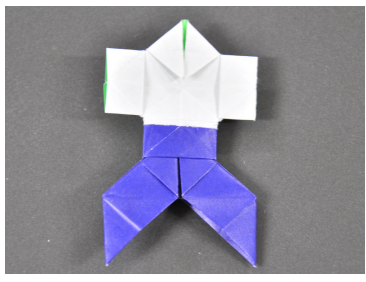
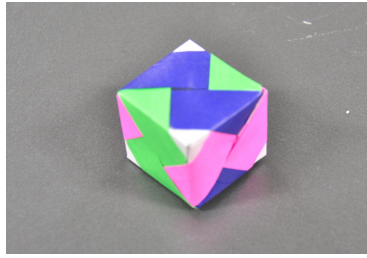
第2章 背景と関連研究

本章では折り紙についての基礎と、折り紙作品の制作支援の従来手法、折り紙作品の制作支援に必要な、折り紙の形状の計測や、折り紙の変形のシミュレーションの関連研究について述べ、本研究の位置づけを行う。

2.1 折り紙の基礎

折り紙には不切一枚折り紙、切り込み折り紙、複合折り紙、ユニット折り紙のような用いる紙の切断の有無や紙の枚数による種類が存在する。表 2.1 に種類毎の折り紙についてまとめる。

表 2.1: 種類毎の折り紙

		
	猫 (不切一枚折り紙)	連鶴 (切り込み折り紙)
紙の切断	無	有
紙の枚数	一枚	一枚
		
	やっこさん (複合折り紙)	ライン立方体 (ユニット折り紙)
紙の切断	無	無
紙の枚数	二枚	六枚

紙の切断とは折り紙の端や内部に切れ込みを入れること、または折り紙の不要な部分を切り離すことである。また、紙の切断によって紙を切り離す場合、切り離した一方のみを用い、複数枚の紙を用いることとは区別される。不切一枚折り紙と切り込み折り紙では共に一枚の紙のみを用いる。しかし、不切一枚折り紙では紙を切断しないのに対し、切り込み折り紙では紙を切断するという点異なる。複合折り紙、ユニット折り紙では紙を切断しないが、複数枚の紙を用いて組み合わせる。複合折り紙とユニット折り紙の相違点は複数枚の紙を同じ形状に折って組み合わせるか異なる形状に折って組み合わせるかである。多くの折り紙に関する先行研究において不切折り紙が対象として扱われる [10] [11]。紙を切断しないことによって、折り紙の面の連続性が保持され、例えば、折り紙の面が他の面を貫通しないなどの数理的な仮定を、容易に設定可能であることが理由であると考えられる。特に正方形の紙を用いる不切正方形折り紙では、一枚の正方形の紙のみを用い、さらに多くの数理的な仮定を容易に設定可能である。本研究では、不切折り紙の部分毎の接続の保持を利用した物理シミュレーションを行うため、不切折り紙を支援対象とする。

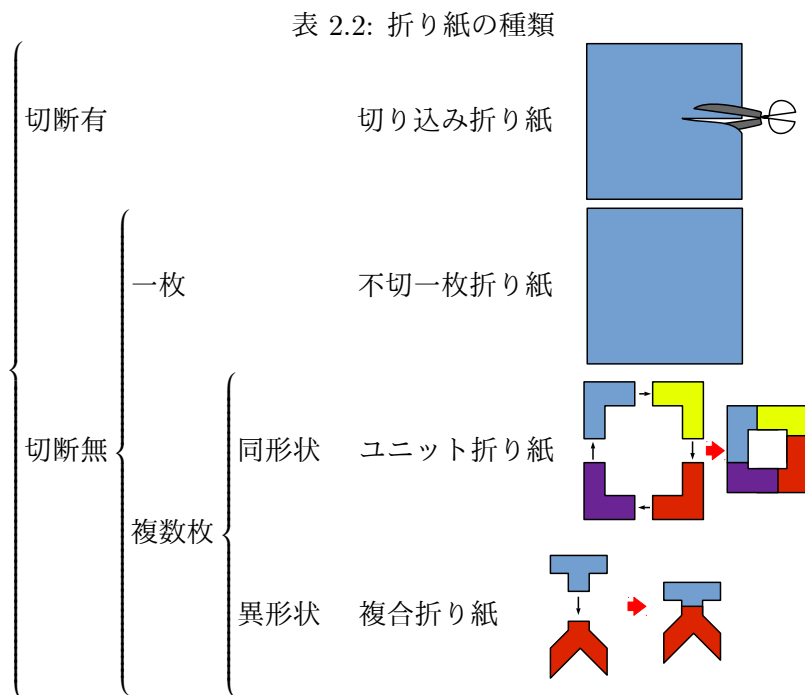


図 2.1 に一般的な折り図を示す。折り図においての折り操作は、折り紙上の角や辺同士を重ねるように折り紙を変形させる動作として定義されている。本論文では、折り図においての定義で折り操作を扱う。折り操作の前後には、多くの場合、折り紙が平坦となる。平坦とは折り紙に厚さがないと仮定した際に、折り紙の全ての部分が平行な状態を指す。折り図は、折り操作の前後の折り紙が平坦になることを利用し、折り操作の前後の折り紙の形状を、一視点から描写することで、折り紙作品の制作を支援している。

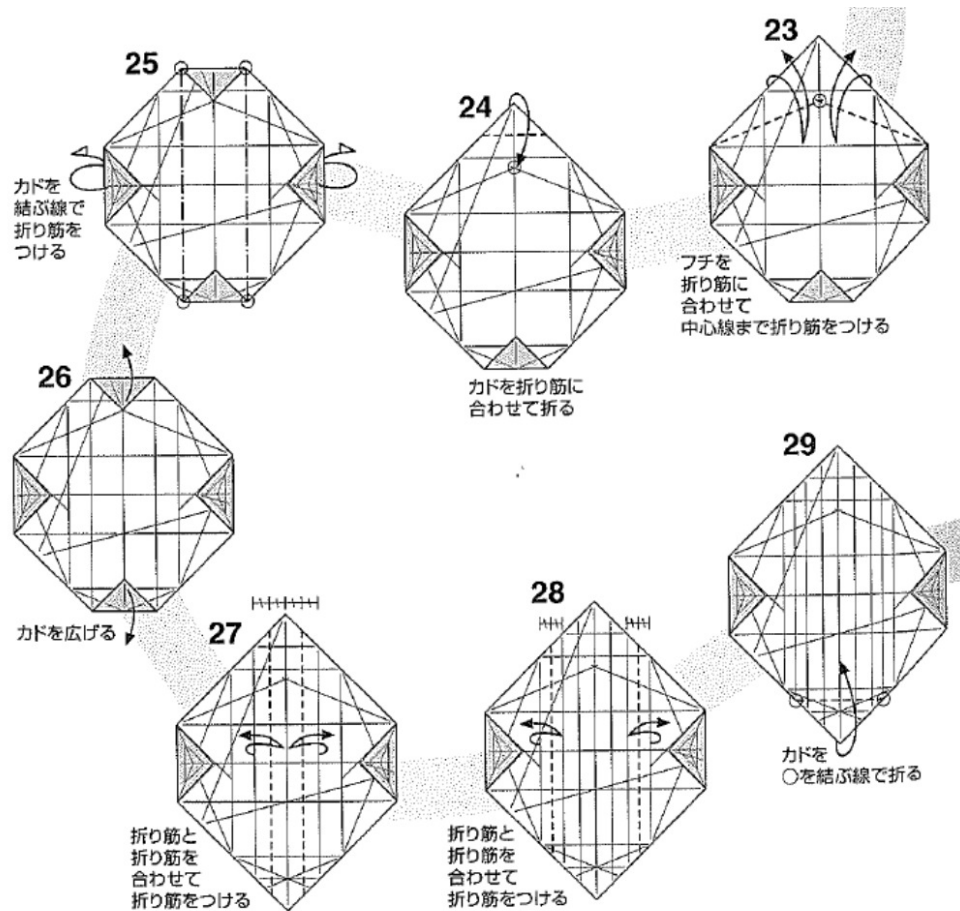


図 2.1: 折り図の例 [12]

2.2 AR を用いた折り紙作品制作支援

折り紙作品の制作支援には、一般的な作業支援技術が用いられている。本論文では、作業とはユーザが行わなければならない一連の行動であるとする。作業は複数の動作である手順に区分され、手順はユーザの行うべき一動作である操作に区分される。一般に、作業の支援は、作業を区分した手順や操作毎に、目標や基準となるような情報を提示することで行われる。現在行っている手順や操作に即した情報を提示するためには、作業の内容を定量化し、定量化した作業を区分し、現在行っている手順や操作を推定する必要がある。作業の内容を定量化し、手順や操作に区分することを作業のモデル化、現在のユーザの動作がどの手順や操作であるか推定することを作業段階の推定と呼称する。作業段階の推定や情報の提示には、ユーザや操作の対象についての位置や形状の変化を計測する必要がある。ユーザや操作の対象についての位置や形状を計測することを作業状況の計測と呼称する。

折り紙作品の模倣制作の作業は折り紙の形状を変化させ、模倣対象の作品の形状に近づけることである。したがって、折り紙作品の模倣制作の支援では、折り紙の形状を変化させるという操作の集合として作業のモデル化を行う。また、作業状況の計測として折り紙の形状を計測し、作業段階の推定に用いると処理が容易である。折り操作は折り紙の形状が基準となっており、折り紙の形状を変化させる方法には、ユーザ毎に個人差が生じるためである。折り紙の形状を用いた作業段階の推定の手法としては、事前に用意した折り紙の形状データとの比較などがある。

徳盛らは輪郭検出を用いた折り紙の形状の計測と制作支援システムを提案している [8]。徳盛らは作業を折り紙の輪郭の変化としてモデル化している。作業状況の計測に輪郭検出技術を用い、カメラ画像中の折り紙の輪郭と、操作の前後における折り紙の輪郭のデータとを比較することで作業段階を推定している。図 2.2 に徳盛らの提案システムの制作支援例を示す。輪郭検出技術を用いた手法の利点として、マーカを設置する必要がないことが挙げられる。しかし、折り紙に厚みがあると、三次元的に輪郭を扱わなければならない、推定精度が下がるという問題がある。

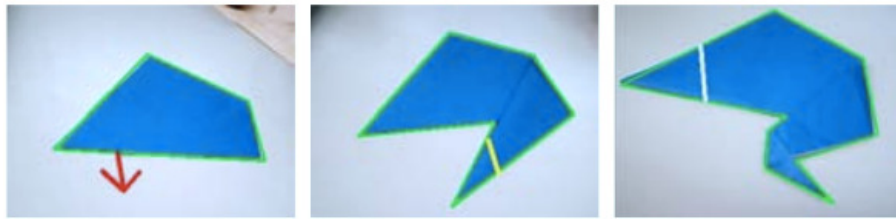


図 2.2: 輪郭検出を用いた折り紙作品制作支援 [8]

後藤らは分割された教師ビデオを用いたシステムを提案しており，支援する作業の一つとして折り紙作品の制作を挙げている [9]．図 2.3 に後藤らの提案システムの教師ビデオの重畳例を示す．後藤らの制作したシステムでは，作業環境にマーカを設置することで，ユーザの姿勢を考慮して，一視点からの教師ビデオをユーザの視点に合わせた映像に変換している．ユーザはビデオを切り替えるために，折り操作の終了を判断する必要がある．また，現実の折り紙と教師ビデオの折り紙について位置合わせは行っておらず，ユーザが現実の折り紙と教師ビデオの折り紙の姿勢を対応付ける必要がある．

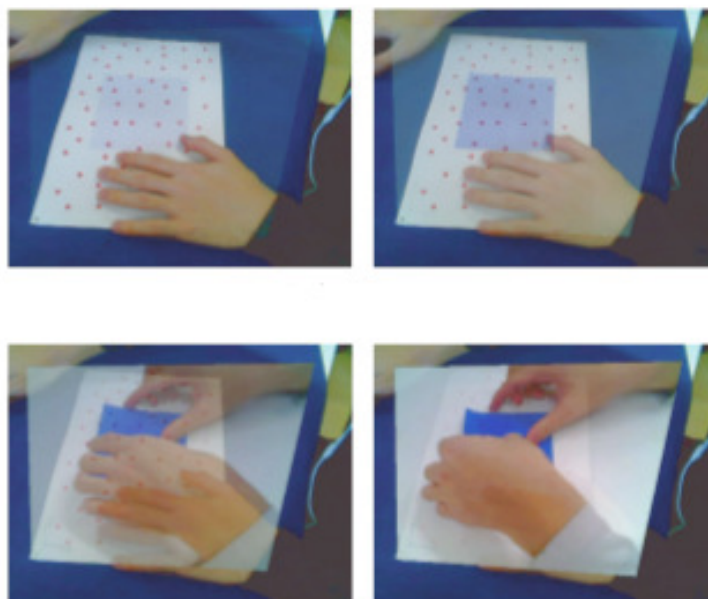


図 2.3: 教師ビデオの重畳による折り紙作品制作支援 [9]

2.3 折り操作のシミュレーション

折り紙の形状変化のシミュレーションを行うためには、折り紙の剛性や非貫通性、連続性などを考慮した、折り操作を含む折り紙の形状の変化を定式化しなければならない。折り紙の形状の変化の定式化を折り紙のモデル化と呼称する。

島貫らは折り操作のシミュレーションを行い、展開図から考えられる全ての折り操作を網羅するために、紙の物理的な性質である局所平坦条件と非貫通性を考慮した折り紙のモデル化を提案している [13]。局所平坦条件は、折り線の一つの交点について、i) 交差する折り線の数が偶数である、ii) 山折りと谷折りの折り線の数の差が2である、iii) 折り線のなす角の一つおきの角度の和は π である、iv) 折り線間の角が鈍角であれば、角をはさむ二つの折り線はともに山折り、または、ともに谷折りである、の四条件である。局所平坦条件が折り紙上の全ての交点に対して成立すると、折り紙は平坦になる [14]。図 2.4 に具体的な交点に対する局所平坦条件を図示する。島貫らは局所平坦条件と非貫通性を考慮した折り紙のモデル化によって、シミュレーションによって生成された、展開図から考えられるが、紙の物理的な性質を満たさない折り操作を除外した。

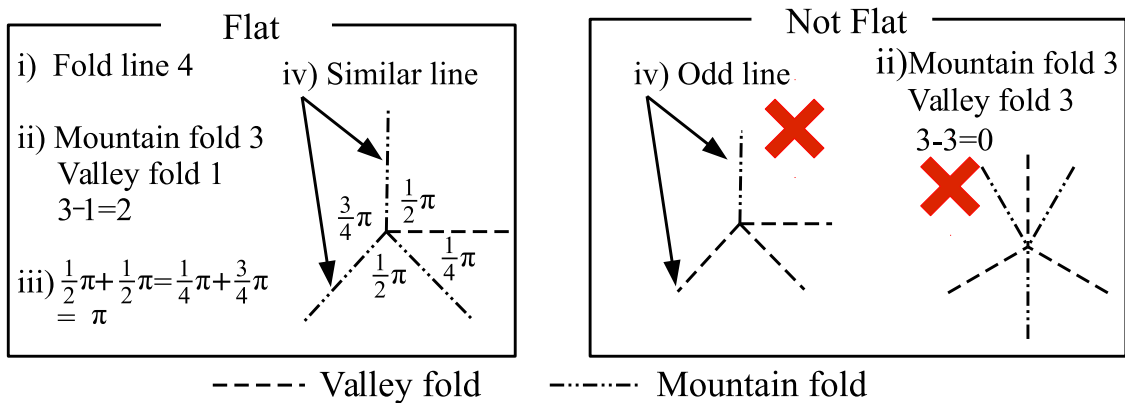


図 2.4: 局所平坦条件 [14]

また、横山らは折り紙の厚さについて考慮し、平坦な折り紙の形状と現実の折り紙の形状との差異を検討するためのシミュレーションを行った [15]。図 2.5 に横山らの提案する折り紙の厚さを示す。折り紙の表面から δ の距離に折り紙が侵入しないモデルを作成することで、 2δ を折り紙の一枚の厚みとし、重なる紙の枚数に比例して折り紙の厚さを変更する。横山らは厚さを考慮したモデルを用いたシミュレーションを行うことで、折り紙の厚さによる形状の変化を再現した。

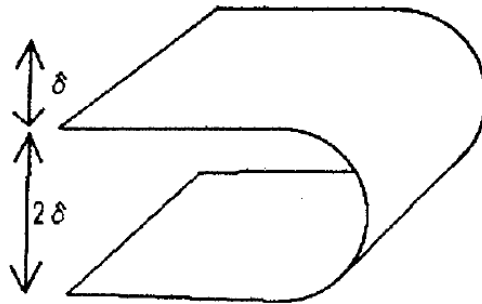


図 2.5: 枚数による折り紙の厚さのモデル [15]

古田らはコンピュータグラフィックスの三次元空間内で折り紙作品を制作するシミュレーションと、そのための折り紙モデルを提案した [16]。図 2.6 に古田らの提案したシミュレーションを示す。古田らの提案手法では、コンピュータグラフィックスの三次元空間内において、折り操作のシミュレーションを行うことができる。古田らは不切折り紙の性質である、折り紙の面の連続性を考慮し、折り線と折り紙の端によって囲まれる面を構成する全ての点をバネで接続したモデルを提案した。バネでつながれた複数の点は、初期形状での相対的な距離を保つように運動する。したがって、折り紙の一部を動かすと接続した他の部分も連動するという特徴がある。

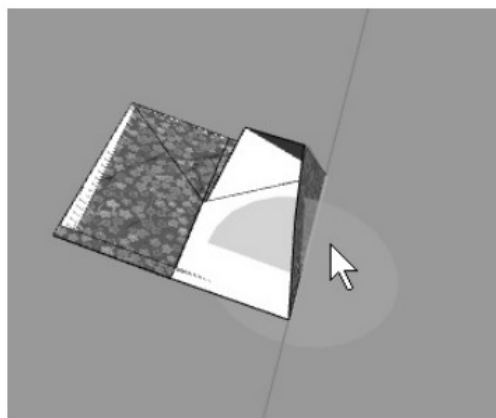


図 2.6: バネ質点系による折り操作のシミュレーション [16]

2.4 折り紙の形状の計測

折り紙の形状の計測手法としては、ステレオマッチングなどによって、折り紙の特徴を考慮せずに形状を計測する手法、輪郭や二次元平面への投影形状のような形状の一部を計測し、全体の形状を推定する手法、マーカを計測し、形状を推定する手法などがある。折り紙の特徴を考慮せずに形状を計測する手法は、折り紙の形状に関して少ない仮定で計測が可能であるが、形状や位置による遮蔽などによって計測できなかった形状を推測することが難しいという特徴がある。形状の一部を用いて全体の形状を推定する手法は、推定に折り紙の形状に関しての仮定を用いることで、形状の一部のみの情報で全体の形状の容易な計測が可能である。しかし、仮定が成立しない場合には、正確な計測が困難である。また、マーカを用いる場合、推定に用いる仮定が比較的少なくなり、マーカの位置姿勢情報のみで全体の形状の計測が可能であるが、マーカが遮蔽されると計測が不可能である。

木下らは折り紙の輪郭を計測することで折り操作を推定する手法を提案した [17]。木下らは特徴点抽出によって部分的な輪郭を検出するハフ変換を用い、折り紙の輪郭を計測した。図 2.7 に木下らの提案手法による折り操作の推定を示す。図の左上がカメラで取得した画像、図の右上がハフ変換を施した画像、図の左下が輪郭を復元した画像、図の右下が推定した折り操作を表した画像である。木下らの計測手法は輪郭の一部が遮蔽されていてもハフ変換によって輪郭を復元可能であるという利点があるが、折り操作の途中の状態などでは計測精度が下がるという欠点がある。

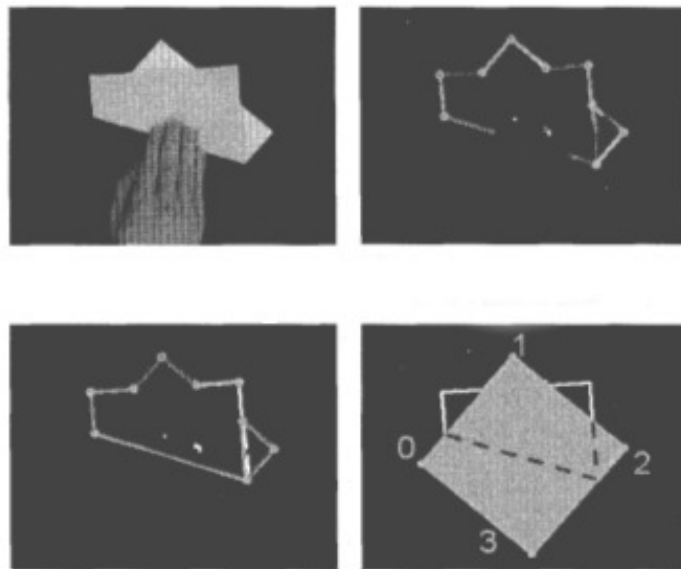


図 2.7: 提案した輪郭の計測と折り操作の推定 [17]

三谷は折り紙に印刷した二次元バーコードを認識し、折り操作を推定する手法を提案している [18]。折り紙の面全体に二次元バーコードを格子状に印刷し、バーコードの位置と方向の変化から折り紙の形状の変化を計測した。図 2.8 に二次元バーコードの印刷された折り紙と、その計測結果を用いて推定した折り紙の形状を示す。図中左は二次元バーコードの印刷された折り紙であり、印刷された二次元バーコードの数は裏表で計 800 個である。図中右は、図中左の折り紙の計測結果から、推定した折り紙の形状である。三谷の計測手法は折り紙が平坦か否かに関わらず高い精度で折り紙の形状を計測可能であるが、多数の二次元バーコードを認識する必要があるために処理速度が遅いという欠点がある。

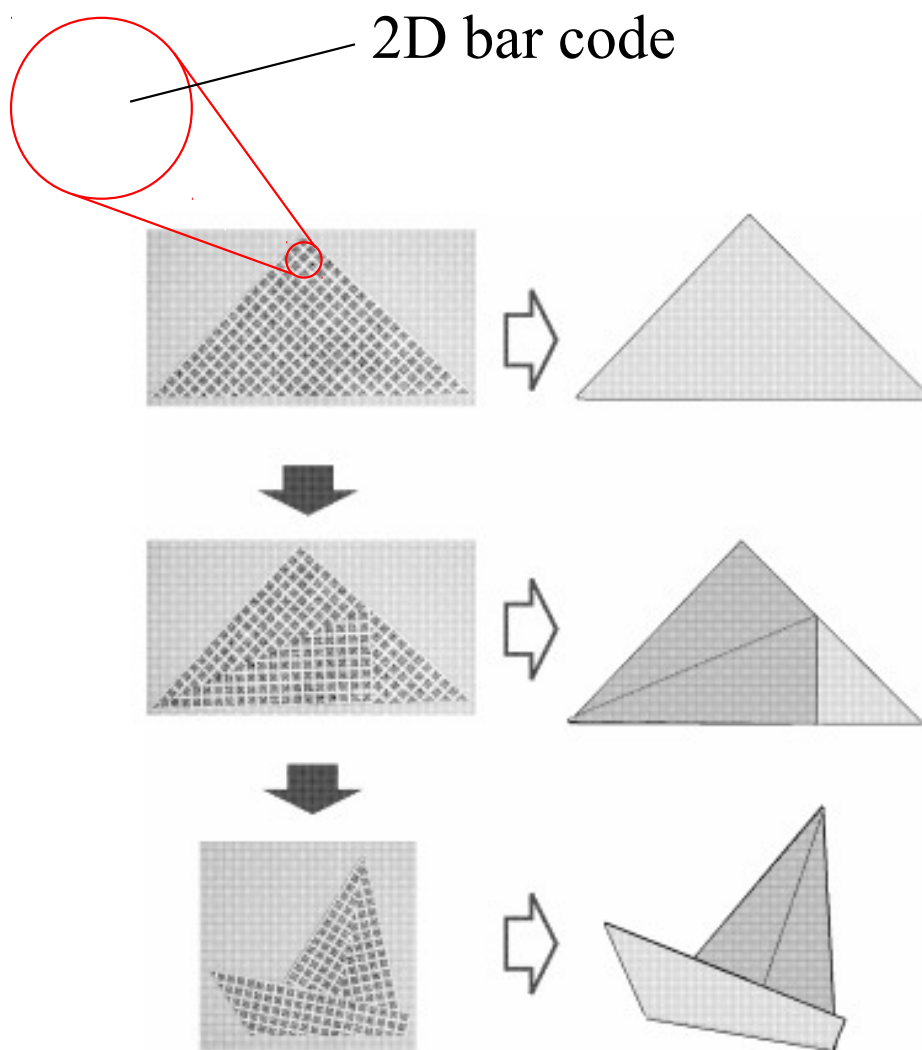


図 2.8: 二次元バーコードによる折り紙の計測 [18]

2.5 本研究の位置づけ

本研究では、折り紙作品の模倣制作時に、折り操作よりも細かく区分した折り紙の変形に応じて、操作の補助となる情報を重畳提示するシステムを構築する。本研究で扱う、折り操作より細かく区分した折り紙の変形の前後の離散的な作業段階を状態と呼称する。また、本研究においては、作業段階の推定を状態推定と呼称する。状態毎の折り紙にはたわみが発生することが考えられる。したがって、折り紙の形状の計測や、状態推定においてたわみを考慮しなければならない。本研究では、折り紙の形状の計測に、マーカの計測による手法を用いる。マーカの三次元空間での位置姿勢情報を計測することで、折り紙の部分毎の三次元の位置姿勢情報を推定し、三次元空間での折り紙の形状の計測を行うことができる。また、折り紙が平坦であるという仮定を用いずに、バネ質点系による物理シミュレーションを利用して、状態毎の折り紙の形状データを生成し、作業段階の推定に用いる。バネによる変形によって、たわみの発生した折り紙に類似した折り紙の形状データを生成することができる。

第3章 折り紙作品の制作補助システム

本章では、本研究で提案する折り紙作品の制作補助システムについて述べる。本システムにおけるシステムの概要と折り紙の扱いについて述べ、システムを構成する処理の詳細について述べる。

3.1 システム概要

システムの処理は事前の処理と支援時の処理とに分けられる。事前の処理としては、バネ質点系を用いた折り操作の物理シミュレーションにより、状態毎の折り紙の形状の情報を生成する。以後、本論文では、事前の処理で生成する折り紙の形状の情報を折り紙の生成形状と呼称する。支援時の処理では、折り紙に印刷したマーカを計測し、マーカの位置姿勢情報を取得する。取得したマーカの位置姿勢情報を、折り紙の面の位置姿勢情報として扱い、折り紙の生成形状の面の位置姿勢情報と比較し、現在の状態を推定する。推定した現在の状態はフィードバックを行い、次回の推定に用いる。推定された状態と取得した情報から折り操作の指示の重畳表示を行い、折り操作を教示する。これらの計測、推定、教示の処理を繰り返すことで折り紙作品の制作を支援する。支援時の処理の流れを図 3.1 に示す。

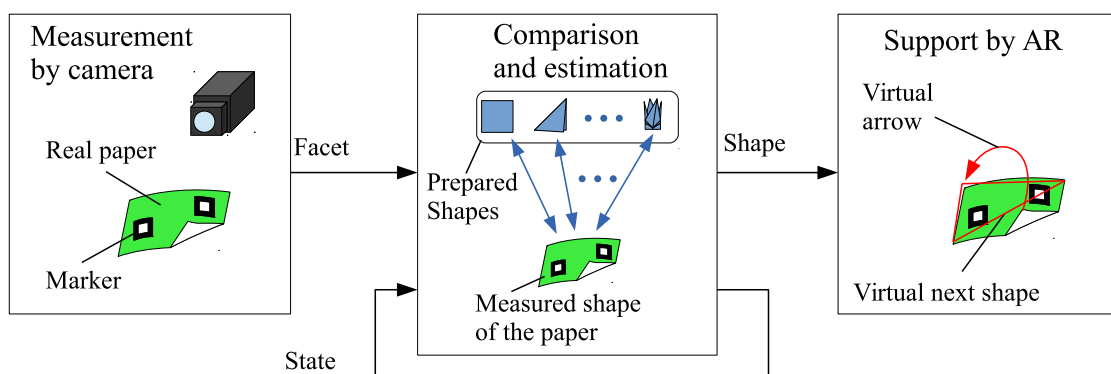


図 3.1: 支援時の処理の流れ

折り紙の頂点と、折り線同士や折り線と折り紙の端の交点を点、折り線と折り紙の端で区切られた折り紙の領域を面と定義する。ただし、面には表裏が存在する。折り紙の生成形状において、折り紙の形状は点と面の集合として扱う。また、折り紙作品の模倣制作を、手順、折り操作に区分してモデル化し、折り操作をさらに細かく区分して状態の集合とする。状態それぞれに対応する折り紙の生成形状を用いて支援時の処理を行う。手順、折り操作、状態の関係を図 3.2 に示す。

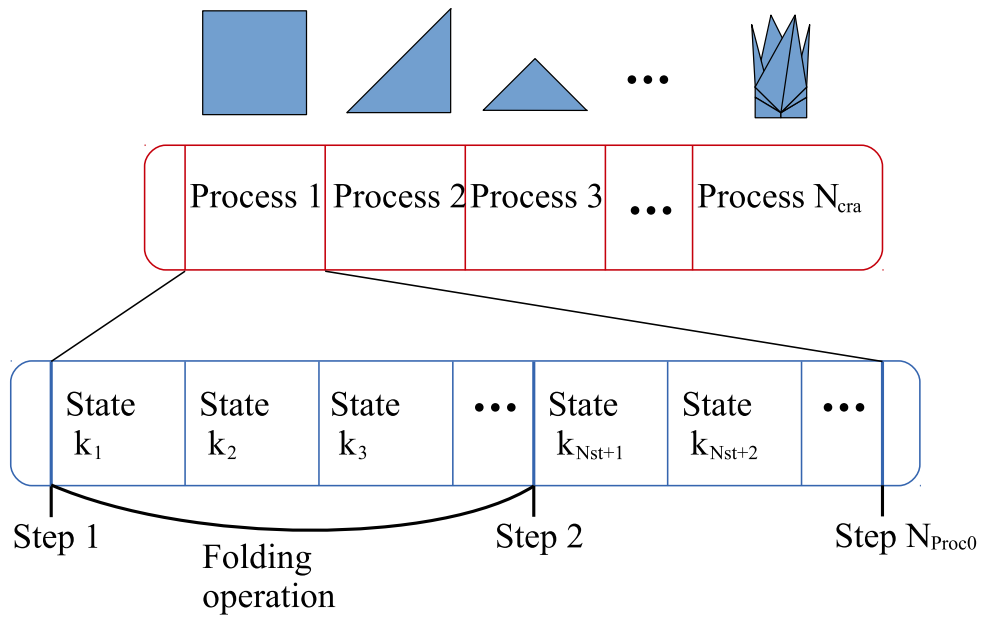


図 3.2: 手順, 折り操作, 状態の関係

3.2 折り紙の形状情報の生成

状態毎の折り紙の生成形状の構造は図 3.3 に示される構造とした。折り紙の生成形状は大きさ (Size), 点の総数 (Number of Node), 面の総数 (Number of Facet), 点群 (Nodes), 面群 (Facets), 現在の手順 (Process) のデータで構成されており, 大きさは折り紙の一辺の長さ, 点群は折り紙上の全ての点, 面群は折り紙上の全ての面を表している。点 n_i は現状での座標 x_{ni} と初期状態での座標 p_{ni} , 現状での速度 v_{ni} , 現状でのシミュレーションにおける座標の変化の法則を表す属性 s を保持している。なお, 折り紙上の全ての点は初期状態において, XY 平面上に存在する。面 u_i は構成する点の番号の情報を保持している。折り紙の表裏を区別するために, 面の保持する点の番号は初期状態の折り紙上で, 表から見て左回りとなる順番である。ただし, 片面に白, 他方の面に白以外の色がついた折り紙に対して, 白い面を表とする。

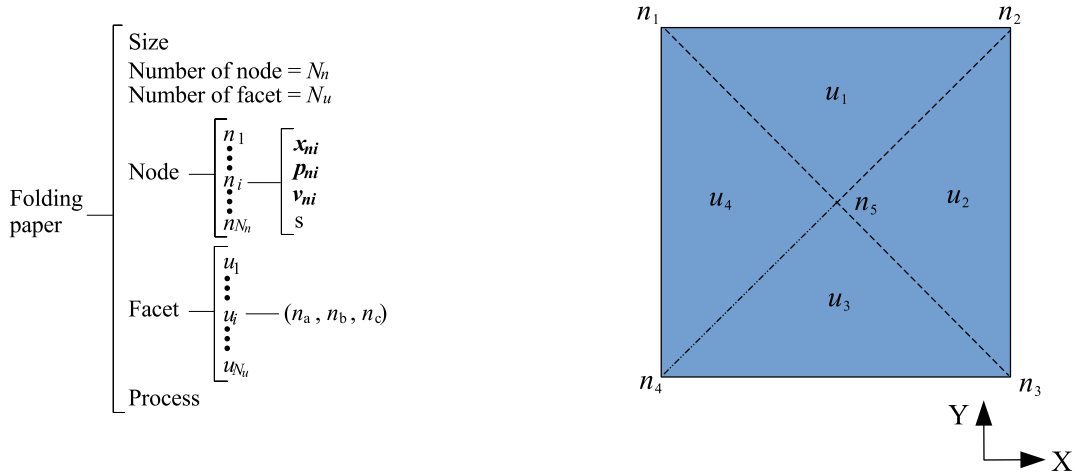


図 3.3: 折り紙の生成形状の構造

状態毎の折り紙の生成形状はバネ質点系による物理シミュレーションで生成する [16]. バネ質点系とは, 質点がバネによって距離を保つように運動する物理現象を元にした, シミュレーション手法である。本研究では, 折り紙のたわみと面の連続性を考慮した形状を作成するために, バネ質点系を用いる。折り紙は, それぞれの面を構成する全ての点がバネで相互に繋がれているという定式化を行い, 折り操作を表す離散的な点の移動とバネによる点の移動によって, 形状の変化を表す物理シミュレーションを行う。物理シミュレーションにおいて折り紙モデルの点には固定点, 移動点, 自由点の属性がある。固定点は折り操作で固定される点, 移動点は折り操作で動かす点, 自由点はバネによる移動によって移動点に連動する点である。一つの折り操作毎に点の属性は更新され, 固定点と移動点に境界条件を与え, 自由点の座標を計算する。

物理シミュレーションにおいて、折り操作は、離散的な移動点の座標の変化で表される。移動点は折り線にあたる折り紙上の線分を軸とした回転移動によって座標を変化させる。移動点の座標の変化は固定点の指定、移動点の指定、折り線の指定、回転角度の指定からなる。折り線は、折り紙上の二点を選択することで指定される。折り線を指定する二点の順序によってベクトルとし、右ネジの方向を回転角度の正の方向とする。シミュレーションでの境界条件とモデルの構造を図 3.4 に示す。

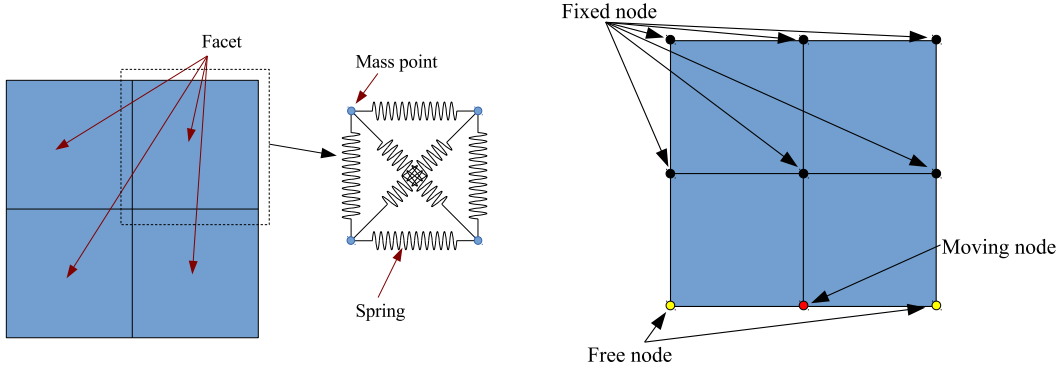


図 3.4: 折り紙モデルの構造

時刻 $t_s + \Delta t_s$ における自由点の一つ n_i を考える。点 n_i を含む一つの面 u_l が点 n_i に加える力 $\mathbf{F}_{il}(t_s + \Delta t_s)$ を、時刻 t_s の点の座標を用いて考えると

$$\mathbf{F}_{il}(t_s + \Delta t_s) = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{N_l} K (|\mathbf{r}_{ij}(t_s)| - |\mathbf{L}_{ij}|) \frac{\mathbf{r}_{ij}(t_s)}{|\mathbf{r}_{ij}(t_s)|} \quad (3.1)$$

となる。ただし、 N_l は面 u_l を構成する点の数、 K はバネ定数、 \mathbf{r}_{ij} は現在の点 n_j に対する点 n_i の相対位置、 \mathbf{L}_{ij} は初期状態の点 n_j に対する点 n_i の相対位置である。点 n_i に加えられる力 $\mathbf{F}_i(t_s)$ は力 $\mathbf{F}_{il}(t_s)$ を点 n_i を含む面全てで計算して足し合わせることで求められる。

$$\mathbf{F}_i(t_s + \Delta t_s) = \sum_{u_L} \mathbf{F}_{il}(t_s + \Delta t_s) \quad (3.2)$$

ただし、 u_L は点 n_i を含む全ての面の集合である。

力 $\mathbf{F}_i(t_s)$ から時刻 $(t_s + \Delta t_s)$ での点 i の速度 \mathbf{v}_i と座標 \mathbf{x}_i を考えると

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_i(t_s + \Delta t_s) &= d_v \mathbf{v}_i(t_s) + d_F \int_{t_s}^{t_s + \Delta t_s} \frac{\mathbf{F}_i(t)}{m} dt \\ &\approx d_v \mathbf{v}_i(t_s) + d_F \frac{\mathbf{F}_i(t_s + \Delta t_s)}{m} \Delta t_s \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i(t_s + \Delta t_s) &= \mathbf{x}_i(t_s) + \int_{t_s}^{t_s + \Delta t_s} \mathbf{v}_i(t) dt \\ &\approx \mathbf{x}_i(t_s) + \mathbf{v}_i(t_s + \Delta t_s) \Delta t_s \end{aligned} \quad (3.4)$$

と近似できる．ただし， d_v は速度の減衰定数， d_F は力の減衰定数， m は点 n_i の質量である． Δt_s 毎に式 (3.4) によって自由点の座標を変化させる．

物理シミュレーションによって生成されるシミュレーション時間毎の形状をダウンサンプリングして，状態毎の折り紙の生成形状とする．時刻毎の形状データと状態毎の折り紙の生成形状の関係を図 3.5 に示す．

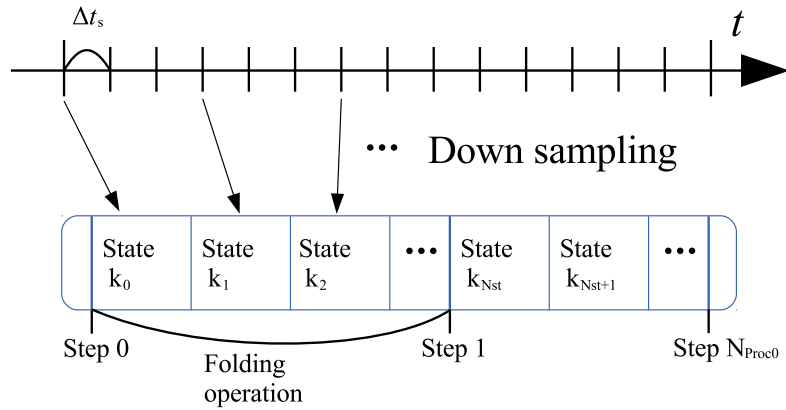


図 3.5: シミュレーションの形状データと状態毎の生成形状の関係

3.3 折り紙の形状の計測

現実の折り紙の形状の計測には、折り紙の端と折り線で区切られた面を区別して面毎の位置と方向を計測する必要がある。面の形状は折り紙作品によって異なるが、同形状の面が複数ある作品も多い。したがって、形状によって面を区別することは困難である。面の区別をし、面の位置と方向を計測するためにマーカを用いる。

折り紙の面毎の重心に識別可能で正方形のマーカを印刷する。マーカの印刷位置の例を図 3.6 に示す。マーカの幾何的な形状を用いることで、カメラの座標系から、カメラで取得した画像中のマーカの座標系への変換行列を得ることができる [19]。また、マーカを識別することで折り紙の面を区別することができる。

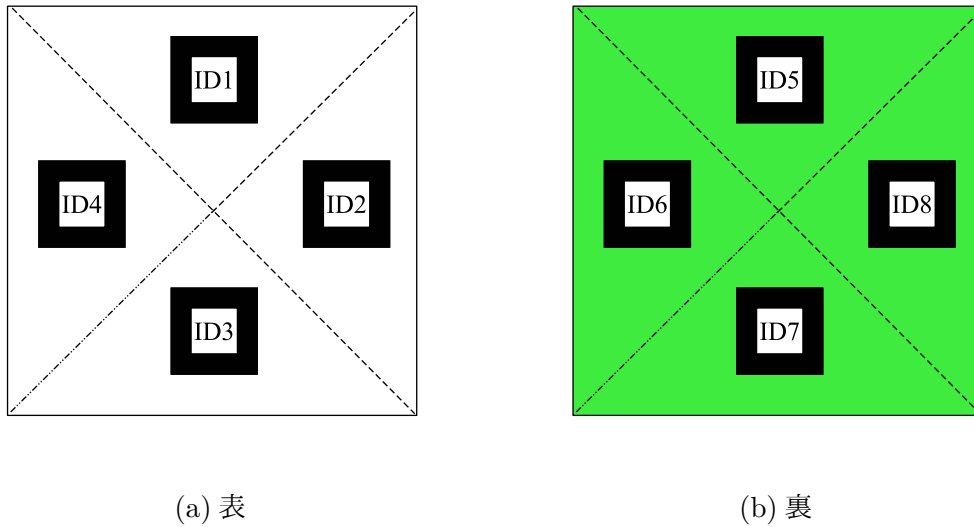


図 3.6: マーカの印刷位置の例

折り紙の形状データの座標系の原点 O とする。計測時の実空間に O と一致させる原点 O' とその座標系 $(X_{O'}, Y_{O'}, Z_{O'})$, カメラ座標系 (X_c, Y_c, Z_c) を設定する。ただし、座標系 $(X_{O'}, Y_{O'}, Z_{O'})$ における $Z_{O'}$ 方向は実空間の鉛直上向きであるとする。カメラ座標系から実空間の原点座標系への変換行列を $\mathbf{A}_{O'c}$ とおくと、式 (3.5) の関係が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} X_{O'} \\ Y_{O'} \\ Z_{O'} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{O'c} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

また、折り紙の面 \tilde{u}_i の重心に設置されたマーカ m_i の座標系を $(X_{m_i}, Y_{m_i}, Z_{m_i})$ とし、カメラ座標系からマーカ座標系への変換行列を $\mathbf{A}_{m_i c}$ とおくと、式 (3.6) の関係が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} X_{mi} \\ Y_{mi} \\ Z_{mi} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{m_i c} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

なお、印刷したマーカは正方形であるので、カメラで取得した画像中のマーカは平行四辺形である。それぞれの辺の長さと同角から、 $\mathbf{A}_{m_i c}$ は求められる。式 (3.5)、式 (3.6) から式 (3.7) が成立するので、原点座標系からマーカ座標系への変換行列 $\mathbf{A}_{m_i O'} = \mathbf{A}_{m_i c} \mathbf{A}_{O' c}^{-1}$ である。ただし、 $\mathbf{A}_{O' c}^{-1}$ は $\mathbf{A}_{O' c}$ の逆行列である。

$$\begin{bmatrix} X_{mi} \\ Y_{mi} \\ Z_{mi} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{m_i c} \mathbf{A}_{O' c}^{-1} \begin{bmatrix} X_{O'} \\ Y_{O'} \\ Z_{O'} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

また、変換行列 $\mathbf{A}_{m_i O'}$ は回転成分 $r_{11} \sim r_{33}$ と平行移動成分 $w_1 \sim w_3$ によって、式 (3.8) のように表される。 $\mathbf{A}_{m_i O'}$ の成分から原点座標系 $(X_{O'}, Y_{O'}, Z_{O'})$ におけるマーカ m_i の座標と方向を推定することができる。平行移動成分の列ベクトル $(w_1, w_2, w_3)^{\mathbf{T}}$ はマーカ m_i の座標系における原点の座標であり、回転移動成分の列ベクトル $(r_{11}, r_{12}, r_{13})^{\mathbf{T}}$, $(r_{21}, r_{22}, r_{23})^{\mathbf{T}}$, $(r_{31}, r_{32}, r_{33})^{\mathbf{T}}$ はマーカ m_i の座標系における原点座標系の正規直交ベクトルである。ただし、 \mathbf{T} は転置を表している。カメラで取得された画像中で、計測された全てのマーカに対する原点座標系からマーカ座標系への変換行列を計測された折り紙の形状を表すパラメータとする。

$$\mathbf{A}_{m_i O'} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} & w_1 \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} & w_2 \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} & w_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

3.4 状態推定

現在の状態を含む折り操作における，移動点の位置の軌跡を実空間の原点座標系に変換し，実空間の鉛直上向き成分の大きさから，折り紙の向きが適切かを判定する．折り紙の向きが適切でない場合，現在の状態の推定を行わず，現在の状態を更新しない．計測された折り紙の形状のパラメータである変換行列を用いて，マーカの座標を，折り紙の生成形状と同じ座標系に変換する．変換されたマーカの座標と方向を，一つの状態の折り紙の形状データの面の重心の座標と面の方向と比較して誤差を計算する．前回の状態推定の処理で推定された状態を用いた，重み付きの総当たり法で複数の状態の生成形状との誤差を比較し，現在の状態において計算される誤差が最も小さいとして，現在の状態を推定する．手順の推定手法の処理の流れを図 3.7 に示す．

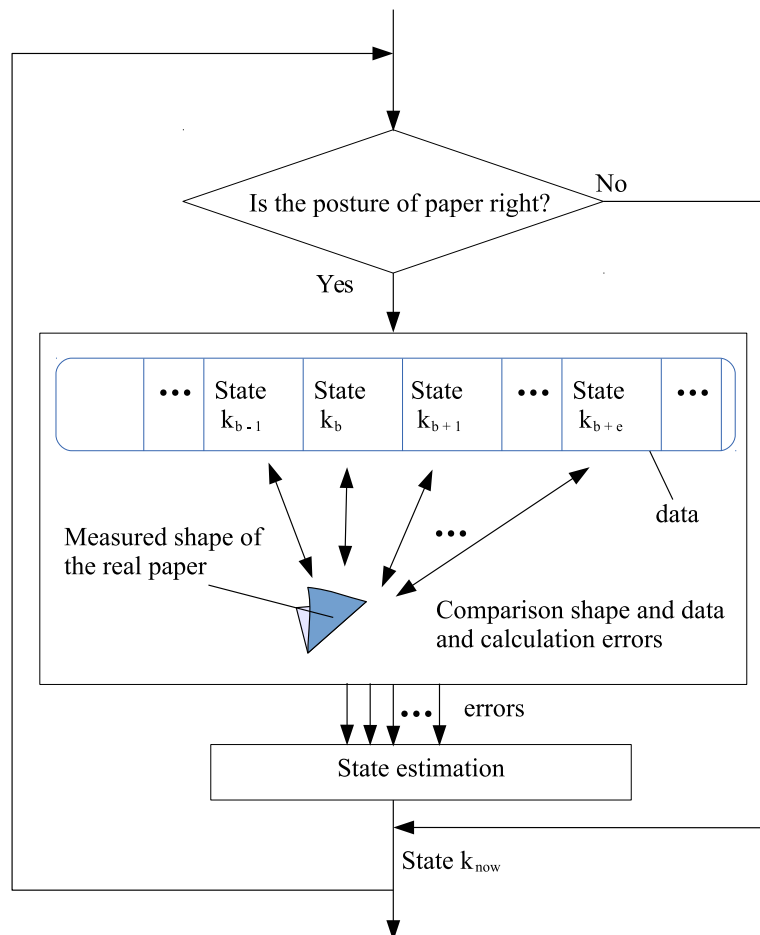


図 3.7: 手順推定の処理の流れ

計測されたマーカ m_i が設置されている折り紙の面 \tilde{u}_i と対応する折り紙の生成形状の面 $u_i(k_a)$ を重ね合わせるための変換行列 $\mathbf{A}_{u_i m_i}(k_a)$ を考える．生成形状の原点の座標系から生成形状の面 $u_i(k_a)$ の重心の座標系への変換行列を $\mathbf{A}_{O u_i}(k_a)$ とすると， $\mathbf{A}_{O' O}$ は式 (3.9) のように計算できる．ただし， $\mathbf{A}_{O' O}$ は実空間での原点の座標系から生成形状の原点の座標系への変換行列であり， 4×4 の単位行列である．

$$\mathbf{A}_{u_i m_i}(k_a) = \mathbf{A}_{O u_i}(k_a) \mathbf{A}_{O' O} \mathbf{A}_{m_i O'}^{-1} \quad (3.9)$$

折り紙の面に印刷されたマーカが $N(> 1)$ 個計測されていると仮定し，現在の状態 k_{now} を含む折り操作における移動点の位置の軌跡を，実空間の原点座標系に変換する．生成形状における固定点のみで構成される面を固定面と呼称する．一つの状態 k_a での生成形状の固定面 $u_{\text{fix}}(k_{now})$ の重心の座標系における，移動点の座標を $(x_{\text{mov}}, y_{\text{mov}}, z_{\text{mov}})^{\mathbf{T}}$ とする．面 $u_{\text{fix}}(k_{now})$ に対応する折り紙の面 \tilde{u}_{fix} の重心の座標系における，移動点の座標は式 (3.10) で表される．

$$\begin{bmatrix} x'_{\text{mov}} \\ y'_{\text{mov}} \\ z'_{\text{mov}} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{u_{\text{fix}} m_{\text{fix}}}(k_a) \mathbf{A}_{m_{\text{fix}} O'} \begin{bmatrix} x_{\text{mov}} \\ y_{\text{mov}} \\ z_{\text{mov}} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

ただし， $(x'_{\text{mov}}, y'_{\text{mov}}, z'_{\text{mov}})^{\mathbf{T}}$ は実空間の原点の座標系における移動点の座標である．実空間の鉛直上向き方向と $(x'_{\text{mov}}, y'_{\text{mov}}, z'_{\text{mov}})^{\mathbf{T}}$ を比較することで，折り紙の向きが適切かを判定する．

折り紙の面に印刷されたマーカが $N(> 1)$ 個計測されていると仮定し，一つの状態 k_a での誤差を考える折り紙の面 \tilde{u}_i と対応する折り紙の生成形状の面 $u_i(k_a)$ を重ね合わせるための変換行列 $\mathbf{A}_{u_i m_i}(k_a)$ を用いて，計測された折り紙の全ての面を移動させる．面 \tilde{u}_j を移動させた後の面を $\tilde{u}'_j(k_a)$ として，式 (3.11)，式 (3.12) が成り立つ．

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{g}}_j(k_a) \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{u_i m_i}(k_a) \begin{bmatrix} -w_1 \\ -w_2 \\ -w_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{z}}_j(k_a) \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{u_i m_i}(k_a) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

ただし、 $\tilde{\mathbf{g}}_j(k_a)$ は移動後の面 $\tilde{u}'_j(k_a)$ の重心の座標、 $\tilde{\mathbf{z}}_j(k_a)$ は移動後の面 $\tilde{u}'_j(k_a)$ の法線ベクトルである。また、固定面 $u_{\text{fix}}(k_a)$ に対応する面 \tilde{u}_{fix} に印刷されたマーカが計測されていない場合、固定面は鉛直上方向を向いていると仮定することで、 $\tilde{u}'_{\text{fix}}(k_a)$ の法線ベクトル $\tilde{\mathbf{z}}_{\text{fix}}(k_a)$ を式 (3.13) のように計算する。

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{z}}_{\text{fix}}(k_a) \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{u_{\text{fix}}m_{\text{fix}}}(k_a) \mathbf{A}_{m_{\text{fix}}O} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

計測された折り紙の他の面とそれに対応する折り紙モデルの面の重心の座標と法線方向から座標の誤差 $er_r(k_a)$ と方向の誤差 $er_\theta(k_a)$ をそれぞれ式 (3.14)、式 (3.15) のように定義する。

$$er_r(k_a) = \frac{1}{N} \sum_j^N |\mathbf{g}_j(k_a) - \tilde{\mathbf{g}}_j(k_a)| \quad (3.14)$$

$$er_\theta(k_a) = \frac{1}{N + n_{\text{fix}}} \sum_j^{N+n_{\text{fix}}} \{1 - \mathbf{z}_j(k_a) \cdot \tilde{\mathbf{z}}_j(k_a)\} \quad (3.15)$$

ただし、 $\mathbf{g}_j(k_a)$ は面 $u_j(k_a)$ の重心の座標、 $\mathbf{z}_j(k_a)$ は面 $u_j(k_a)$ の法線ベクトル、 n_{fix} は計測されていない固定面の数である。

前回の推定の処理において推定された状態 k_{now} の近傍の状態について、 $er_\theta(k)$ 、 $er_r(k)$ を算出し、 $er_r(k)$ が閾値 er_{rth} より小さい状態の中で、最も $er_\theta(k)$ が小さい状態 k_{min} を現在の状態 k'_{now} であるとする。

$$k_{\text{min}} = \arg \min_k er_\theta(k) \quad (er_r(k_{\text{min}}) < er_{\text{rth}}) \quad (3.16)$$

ただし、 $\arg \min$ は後に続く関数を最も小さくする引数を返す関数である。また、 $k_b - k_p$ の値が基準の範囲内の状態 k_p 全てを、手順 k_b の近傍の状態とする。 k_{min} が複数存在する場合、 $|k_b - k_q|$ の値が最も小さい状態 k_q を現在の状態 k'_{now} であるとする。また、推定された現在の状態 k'_{now} を次回の推定の処理に用いる。

3.5 折り操作の教示

推定された状態において、次に行うべき折り操作の教示を、カメラ画像への折り紙の変形の指示の重畳表示によって行う。推定された現在の状態を含む複数の折り操作の生成形状を用いて、点の移動の軌跡と折り操作中で最後の状態の折り紙の生成形状をカメラ画像へ重畳表示し、折り操作の教示とする。また、状態推定において折り紙の向きが適切でないと判定された場合には折り操作の教示を変化させ、折り紙の向きの変更を促す。

点の移動の軌跡は、複数の折り紙の生成形状の表す複数の状態での移動点の座標の推移である。移動点の座標を生成形状の原点座標系からカメラ座標系に変換し、二次元のウィンドウ座標系に変換して表示することで、カメラ画像へ点の移動の軌跡を重畳表示する。同様に折り紙の生成形状についても、二次元のウィンドウ座標系に変換し、カメラ画像へ重畳表示する。点の座標を生成形状の原点座標系からカメラ座標系に変換するために、マーカ座標系を用いる。また、マーカの計測誤差を考慮し、より折り操作の教示の安定性を高めるために、点の座標を計測された全てのマーカ座標系毎に算出し、外れ値を除く処理を行う。図 3.8 に実際に表示される教示例を示す。

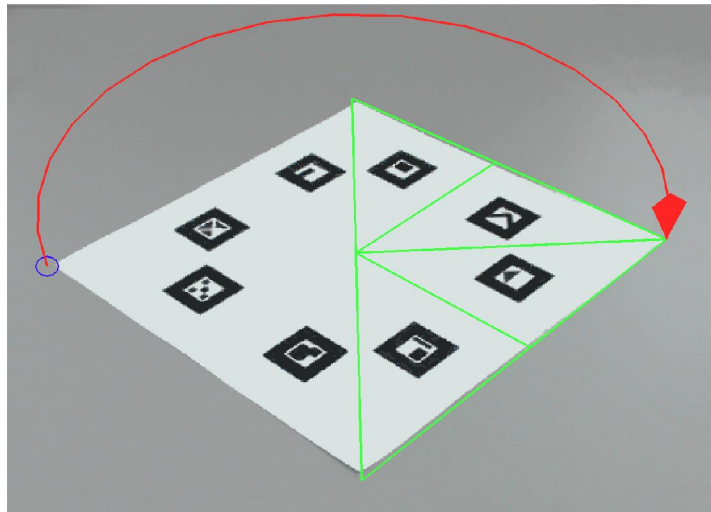


図 3.8: 実際の折り操作教示例

移動点 n_{mov} の座標とをカメラ座標系 (X_c, Y_c, Z_c) における座標に変換するために、計測されたマーカの座標系を用いる。計測されたマーカが複数ある場合は、マーカ毎に (X_c, Y_c, Z_c) における n_{mov} の座標を計算し、外れ値を除いた平均値を重畳表示に用いる。計測されたマーカの個数を $N(> 2)$ 個と仮定し、マーカ毎に計算した (X_c, Y_c, Z_c) における n_{mov} の座標の集合を U とする。 U から無作為に $N_r(> 1)$ 個の座標を選択し、平均値を計算する。 U のうち、無作為に選択された座標以外の座標と平均の座標の距離が閾値未満である数を、この平均の座標の得点とする。座標の選択、平均値計算、得点計算を、 $N(> 2)$ に応じて繰り返したのうち、最も得点の高い平均の座標を外れ値の検出に用いる基準座標とする。 U に含まれる座標のうち、基準座標からの距離が閾値以上である座標を外れ値とする [20]。

3.6 実験における形状の評価

形状の評価のために、制作された折り紙作品を展開し、カメラで折り紙を計測する。取得した画像上での折り紙の角の座標を、生成形状の対応する点の初期状態の座標に一致させるホモグラフィ変換行列を計算する。折り紙上の折り線の交点の座標を生成形状の座標系へホモグラフィ変換し、変換した折り線の交点の座標と生成形状の対応する点の座標の距離を、折り紙上の全ての交点について求め、全ての交点の距離の平均値を形状の誤差とする。画像上での折り紙の角の座標を $(\hat{x}_a, \hat{y}_a)^T$, $(\hat{x}_b, \hat{y}_b)^T$, $(\hat{x}_c, \hat{y}_c)^T$, $(\hat{x}_d, \hat{y}_d)^T$ とし、生成形状の対応する点の初期状態の座標を $(\tilde{x}_{pa}, \tilde{y}_{pa}, \tilde{z}_{pa})^T$, $(\tilde{x}_{pb}, \tilde{y}_{pb}, \tilde{z}_{pb})^T$, $(\tilde{x}_{pc}, \tilde{y}_{pc}, \tilde{z}_{pc})^T$, $(\tilde{x}_{pd}, \tilde{y}_{pd}, \tilde{z}_{pd})^T$ とする。ホモグラフィ変換行列 \mathbf{H} は擬似逆行列を用いて、

$$\mathbf{H} = \tilde{\mathbf{Q}} \cdot \hat{\mathbf{Q}}^T \cdot (\hat{\mathbf{Q}} \cdot \hat{\mathbf{Q}}^T)^{-1} \quad (3.17)$$

となる。ただし、 $\tilde{\mathbf{Q}}$, $\hat{\mathbf{Q}}$ は

$$\tilde{\mathbf{Q}} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{pa} & \tilde{x}_{pb} & \tilde{x}_{pc} & \tilde{x}_{pd} \\ \tilde{y}_{pa} & \tilde{y}_{pb} & \tilde{y}_{pc} & \tilde{y}_{pd} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$\hat{\mathbf{Q}} = \begin{bmatrix} \hat{x}_a & \hat{x}_b & \hat{x}_c & \hat{x}_d \\ \hat{y}_a & \hat{y}_b & \hat{y}_c & \hat{y}_d \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

である。形状の評価基準である形状の誤差 er_s は式 (3.20) で表される。

$$er_s = \frac{1}{N_n - 4} \sum_i^{N_n} \left\| \begin{bmatrix} \hat{x}_i \\ \hat{y}_i \\ 1 \end{bmatrix} - \mathbf{H} \begin{bmatrix} \tilde{x}_{pi} \\ \tilde{y}_{pi} \\ 1 \end{bmatrix} \right\| \quad (3.20)$$

第4章 システムの実装と評価実験

本章ではシステムの実装と評価実験について述べる。提案システムの実装として、二つの折り紙作品の生成形状を用いて、折り操作の状態推定が可能であるかを確認した。さらに、被験者実験により提案システムの有効性を評価した。

4.1 システムに用いた機材

本システムは、コンピュータ、ディスプレイ、カメラで構成される。教示する際のカメラの取得画像の方向を考慮して、カメラは光軸方向が鉛直下向きで、カメラの上方向がユーザの前方向となるようにカメラを配置する。また、折り紙に印刷するマーカとしてARマーカを使用した [21]。ARマーカの認識精度を上げるために、両面とも白い紙を用いて実装した。本システムに用いたコンピュータとカメラの仕様をそれぞれ、表 4.1、表 4.2 に示す。

表 4.1: コンピュータの仕様

項目	
CPU	Intel Core i3-3217U 1.80 GHz
Memory	16 GB
OS	Ubuntu 14.04.1 LTS

表 4.2: カメラの仕様

項目	
画素数	300 万画素
フレームレート	最大 30 FPS
解像度	1920×1080

4.2 対象とした折り紙作品

提案システムの実装として、「つるの基本形」と「家」の折り紙作品を模倣制作の対象とした。「つるの基本形」と「家」の折り紙作品の完成形状を図 4.1 に示す。

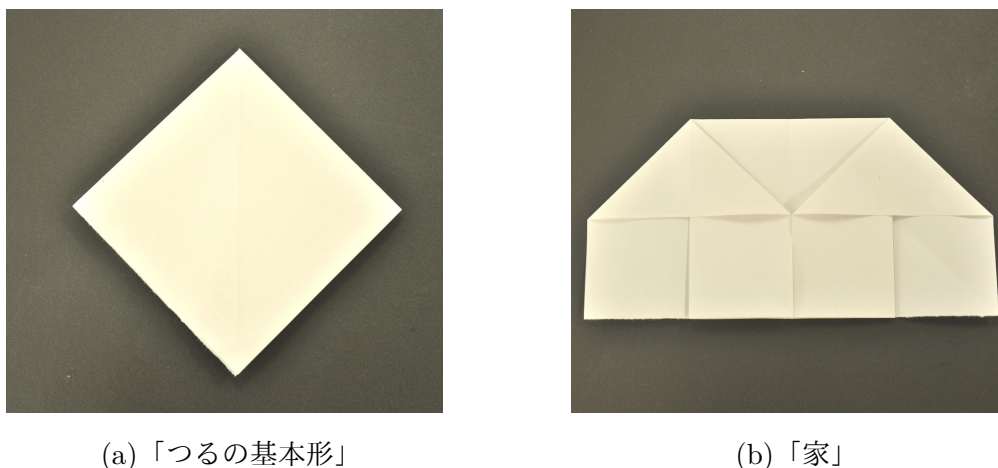
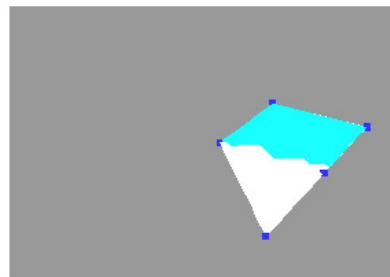
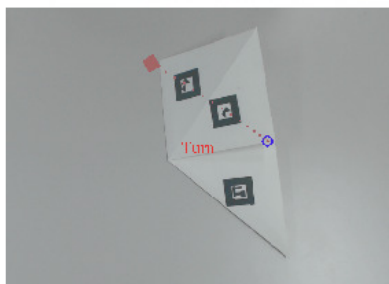
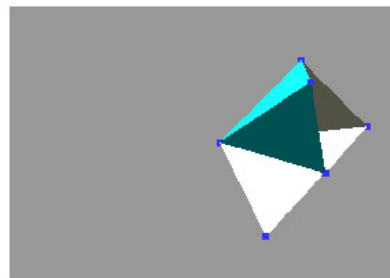
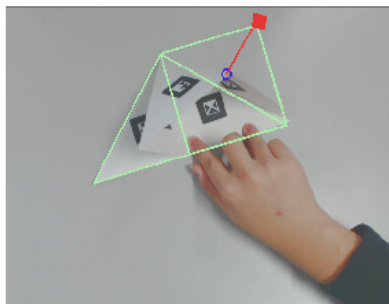
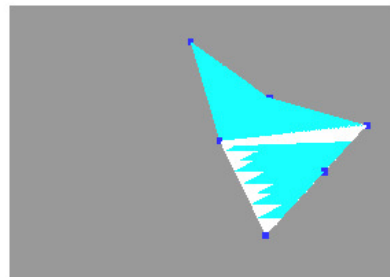
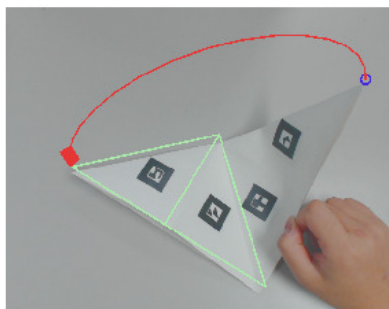
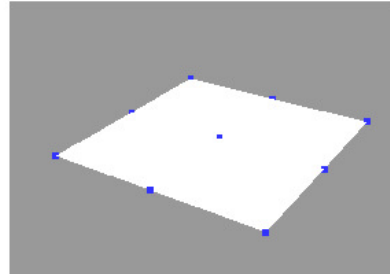
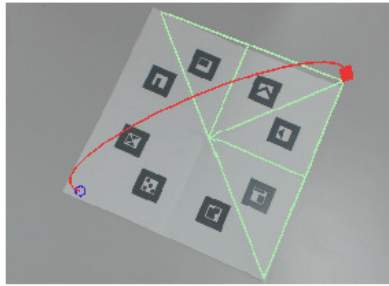


図 4.1: 折り紙作品の完成形状

4.3 モデルデータと状態推定

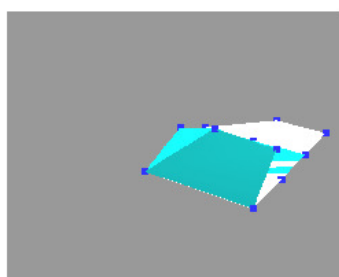
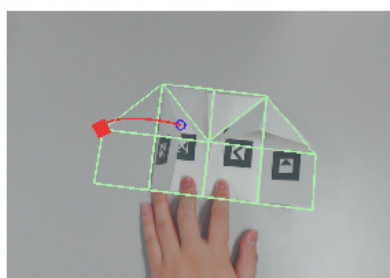
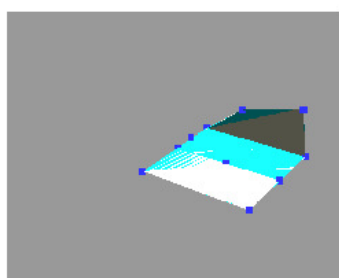
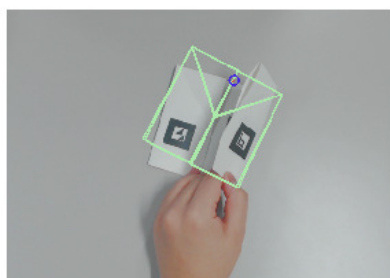
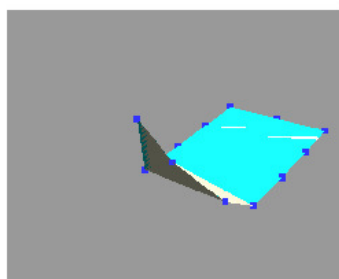
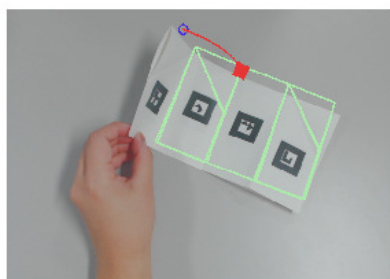
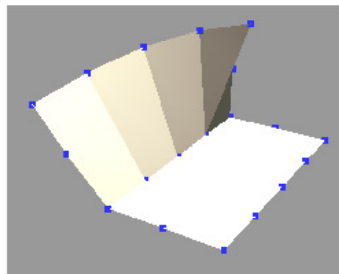
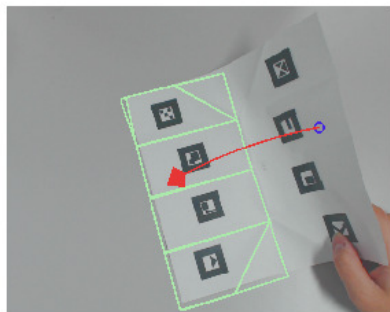
「つるの基本形」と「家」の折り紙作品について、物理シミュレーションにより生成形状を作成した。また、それぞれの折り紙について状態推定が可能であるかを確認した。図 4.2, 図 4.3 にそれぞれの折り紙の状態推定の結果と折り操作の教示の一部を示す。なお、図中右が折り紙の状態推定の結果、図中左が折り操作の教示である。



Overlaid instruction

Estimated state

図 4.2: 「つるの基本形」の状態推定の結果と折り操作の教示



Overlaid instruction

Estimated state

図 4.3: 「家」の状態推定の結果と折り操作の教示

4.4 提案システムを用いた折り紙操作の評価

提案したシステムの有用性を評価するために、折り図と提案システムを用いて、二種類の折り紙作品の模倣制作を行う被験者実験を行った。実験風景を図 4.4 に示す。

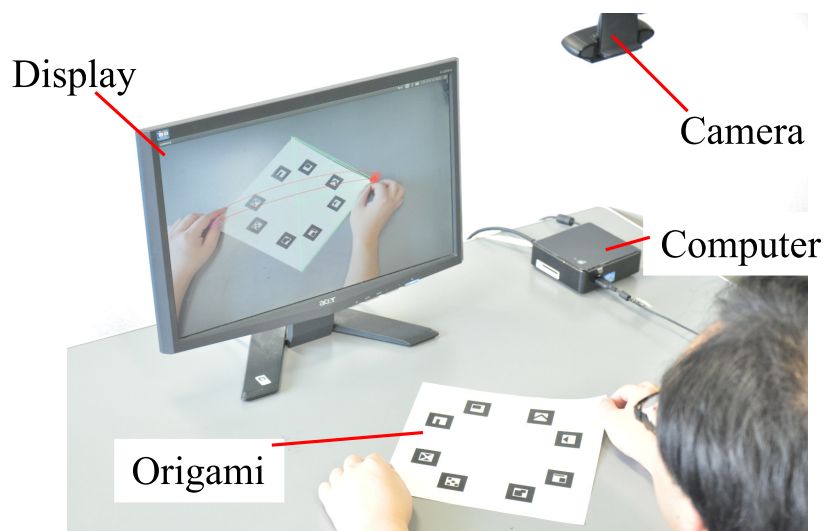


図 4.4: 実験風景

折り図を用いた場合と、提案システムを用いた場合における模倣制作に必要とされた時間を計測して比較した。折り図やシステムの示す折り操作が理解できなかった場合、計測と模倣制作をやり直すこととした。なお、やり直す際、折り図では必ず折り操作の説明をし、システムでは教示が正しかった場合にのみ説明を行った。また、やり直した回数を記録した。図 4.5, 図 4.6 に実験に用いた二つの折り図を、図 4.7, 図 4.8 に実験に用いた折り紙のマーカの位置を、図 4.9(a), (b) に実験に用いた折り紙で作成した二種類の折り紙作品を、それぞれ示す。

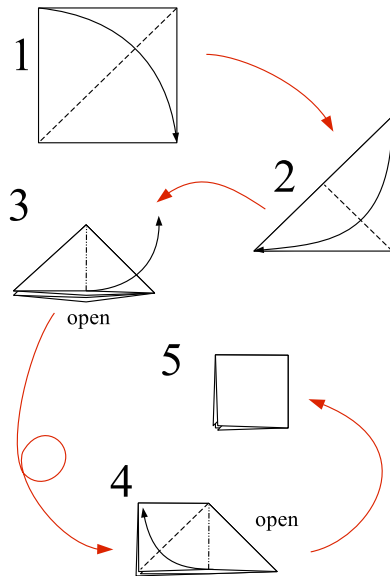


図 4.5: 「つるの基本形」の折り図

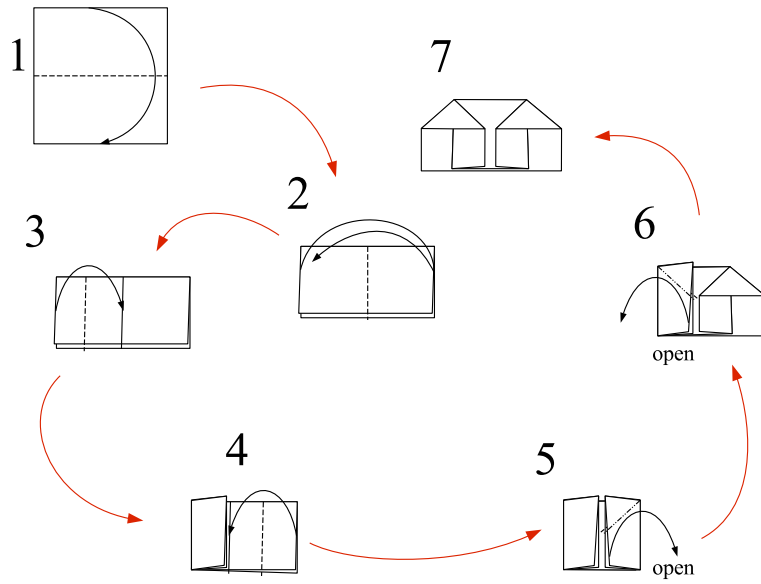
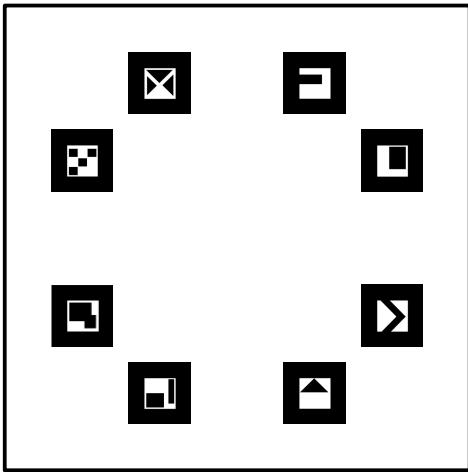
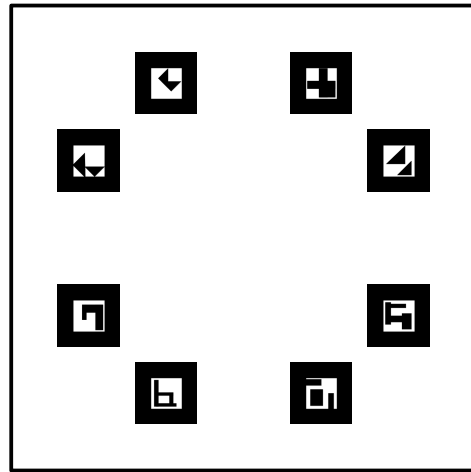


図 4.6: 「家」の折り図

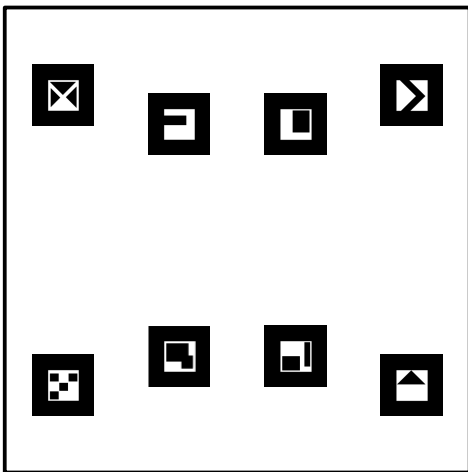


(a) 表

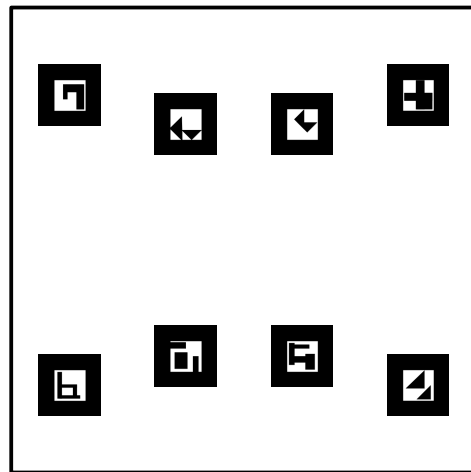


(b) 裏

図 4.7: 「つるの基本形」に用いた折り紙のマーカの位置

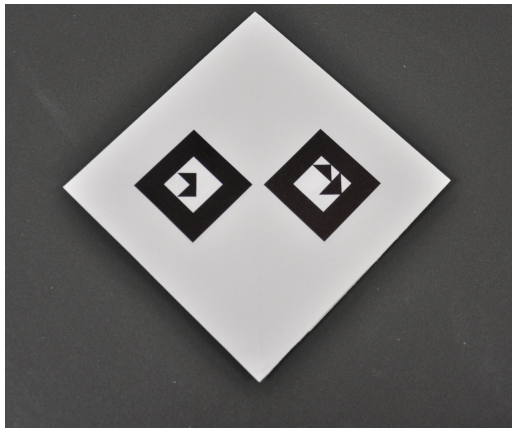


(a) 表

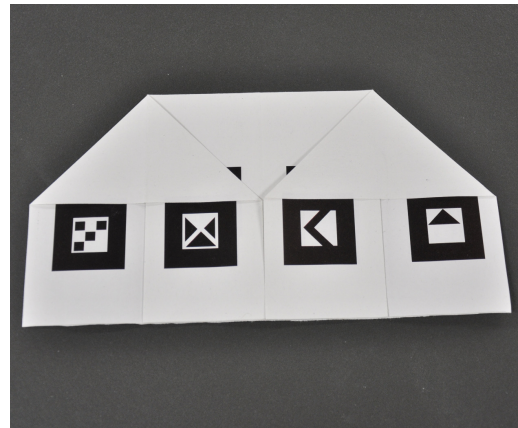


(b) 裏

図 4.8: 「家」に用いた折り紙のマーカの位置



(a) 「つるの基本形」



(b) 「家」

図 4.9: 実験における折り紙作品の完成形状

全ての被験者は折り紙作品を模倣制作する際、机の上で行い、それぞれの試行回数は一回とした。なお、折り紙作品の模倣制作を行う前にシステムに慣れるための訓練を1分程度行った。ただし、訓練時に「つるの基本形」、「家」の生成形状は用いなかった。また、折り図を用いて折り紙作品の模倣制作を行う際には、折り図の折り線や矢印の説明を同時に提示した。

二十代の男性8名を被験者とし、学習効果を考慮するために、同人数の二つの被験者群にわけ、それぞれをグループA、グループBとした。グループAの被験者は、折り図を用いて「つるの基本形」の模倣制作を行った後、提案システムを用いて「つるの基本形」の模倣制作を行った。次に「家」について、「つるの基本形」と逆の順番で折り図と提案システムを用いて、模倣制作を行った。グループBの被験者は「つるの基本形」、「家」の順に、グループAと逆の順番で折り図と提案システムを用いて、模倣制作を行った。

折り図と提案システムの比較のために、模倣制作に要した時間を計測した。また、制作された折り紙作品を回収し、折り紙の形状の誤差 er_s を評価した。提案システムの提示情報や折り図の意味が理解できない場合には、提案システムの再起動や折り操作の説明を行い、回数を記録した上で、最初から模倣制作をやり直した。以後、実際に制作されたそれぞれの折り紙作品を制作作品、計測した時間を制作時間、記録したやり直しの回数を失敗回数と呼ぶ。

4.5 実験結果

「つるの基本形」, 「家」の制作時間を, それぞれ図 4.10, 図 4.11 に示す. また「つるの基本形」, 「家」の形状の誤差をそれぞれ図 4.12, 図 4.13 に示す. なお, 理想的な折り紙作品を同様に評価した際の形状の誤差は 0.48 mm であった. 「つるの基本形」の模倣制作時の失敗回数を図 4.14 に示す. なお, 「家」の模倣制作時の失敗回数は全被験者において, 折り図, 提案システム共に 0 回であった.

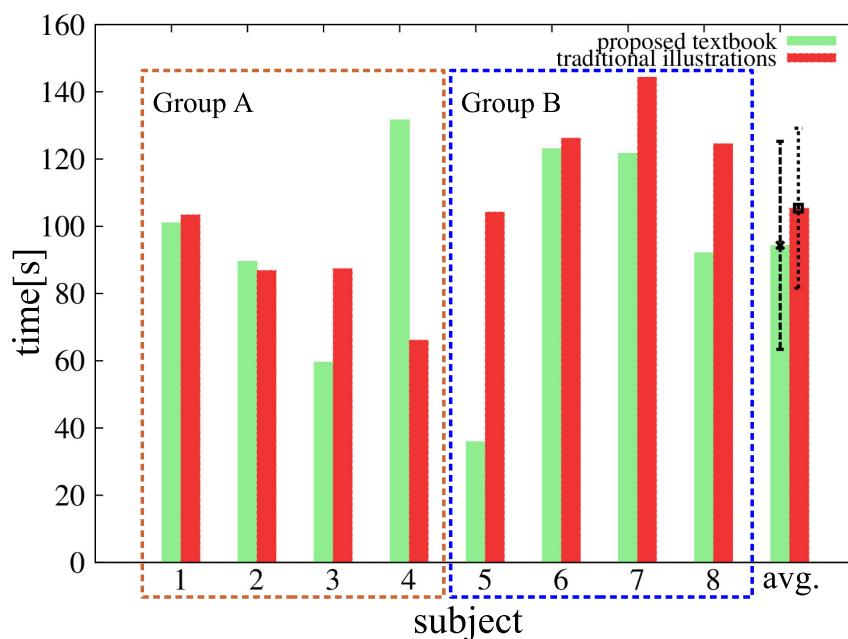


図 4.10: 「つるの基本形」の制作時間

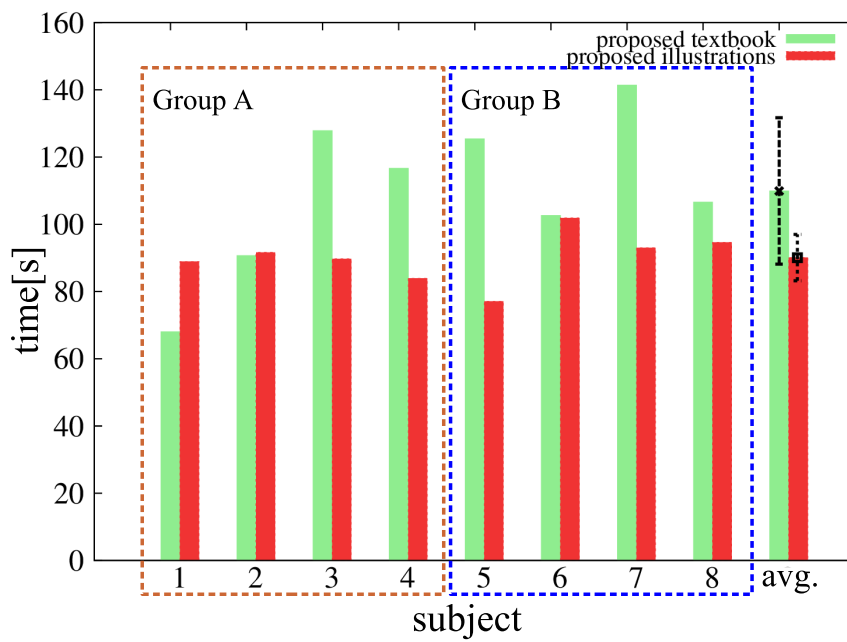


図 4.11: 「家」の制作時間

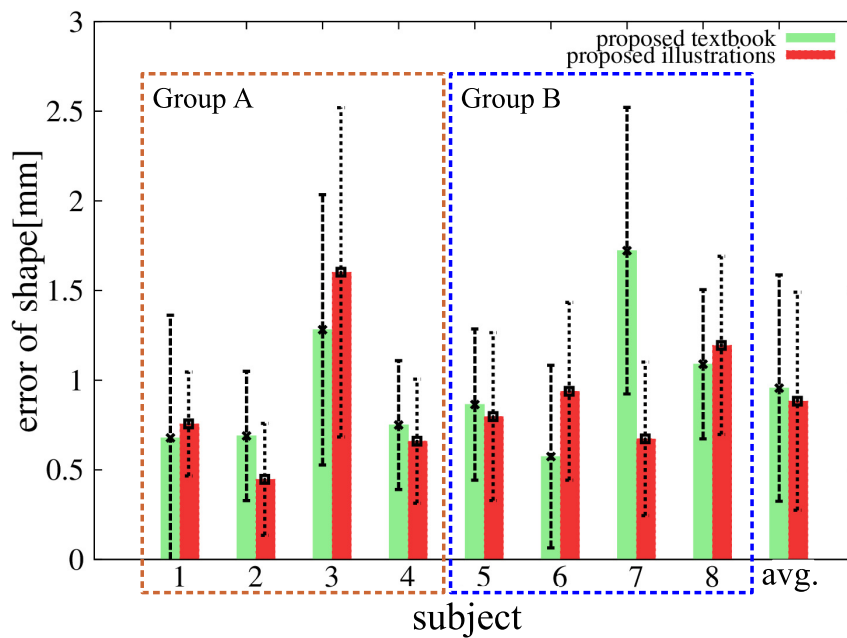


図 4.12: 「つるの基本形」の形状の誤差

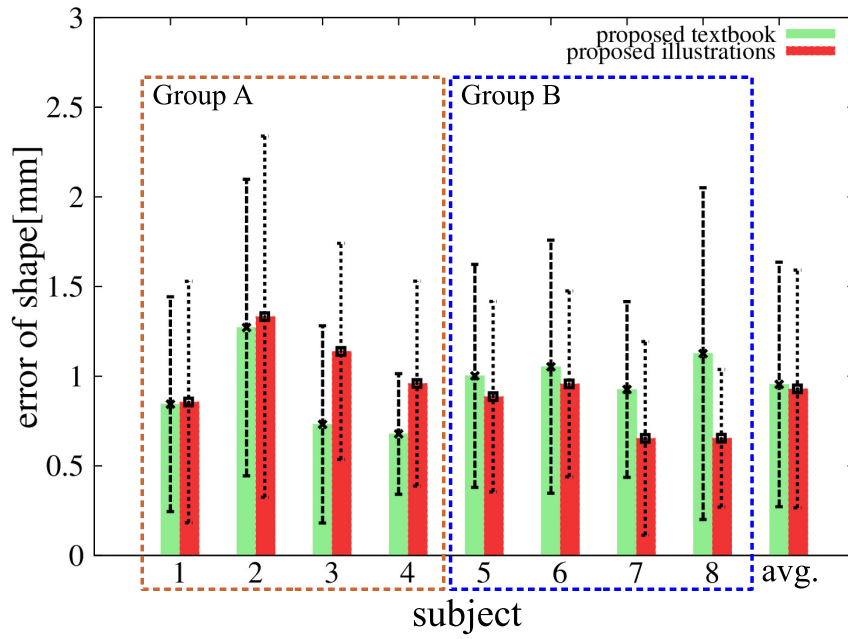


図 4.13: 「家」の形状の誤差

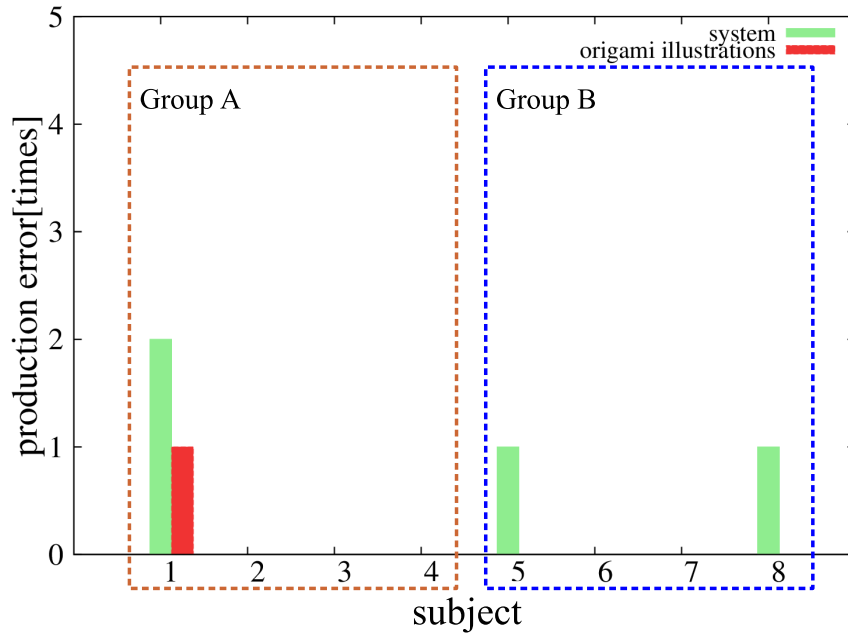
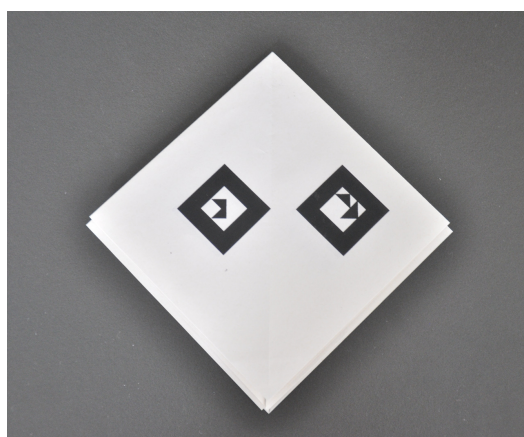
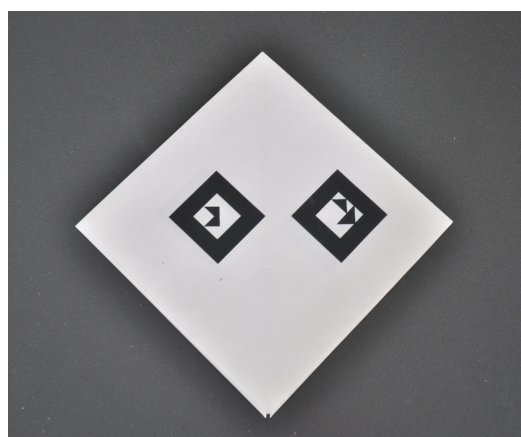


図 4.14: 「つるの基本形」の失敗回数

「つるの基本形」の模倣制作については、提案システムを用いた場合の制作時間の平均は 94.3 秒、形状の誤差の平均は 0.96 mm であったのに対し、折り図を用いた場合の制作時間の平均は 105.4 秒、形状の誤差の平均は 0.88 mm であった。また、提案システムを用いた場合の失敗回数は全被験者で計 4 回であったのに対し、折り図を用いた場合の失敗回数は全被験者で計 1 回であった。「家」の模倣制作については、提案システムを用いた場合の制作時間の平均は 109.9 秒、形状の誤差の平均は 0.95 mm であったのに対し、折り図を用いた場合の制作時間の平均は 90.1 秒、形状の誤差の平均は 0.93 mm であった。なお、折り図を用いた制作作品毎の最大の部分形状の誤差の平均は「つるの基本形」で 0.95 mm, 「家」で 0.93 mm であった。図 4.15, 図 4.16 に「つるの基本形」, 「家」それぞれで形状の誤差が最大であった制作作品と最小であった制作作品を示す。

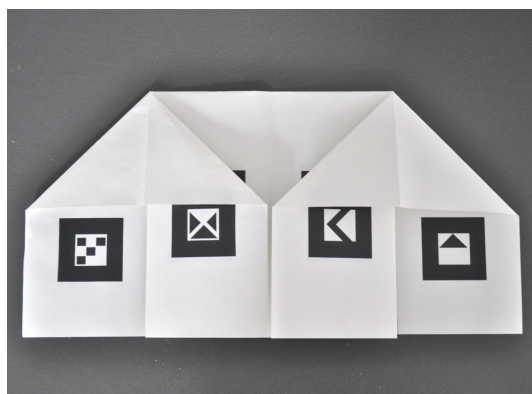


(a) 形状の誤差が最大の制作作品

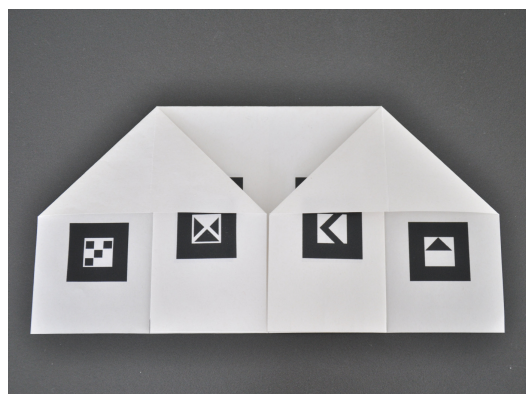


(b) 形状の誤差が最小の制作作品

図 4.15: 「つるの基本形」の制作作品



(a) 形状の誤差が最大の制作作品



(b) 形状の誤差が最小の制作作品

図 4.16: 「家」の制作作品

4.6 考察

グループ A, B のそれぞれの結果の比較から学習の影響は確認されなかった。

「つるの基本形」の模倣制作について、提案システムを用いた場合の方が、折り図を用いた場合よりも制作時間の平均は短かった。また、失敗例に関して、折り図を用いた場合は折り操作の方法が理解できなかったのに対し、提案システムを用いた場合は状態推定において誤りがあり、正しく情報提示が行えていない場合のみであった。したがって、状態推定の精度に問題はあるものの、提案システムを用いて明瞭な折り操作教示が可能であることが示唆され、制作時間も短縮することが可能であることが示唆される。

「家」の模倣制作について、折り図を用いた場合の方が、提案システムを用いた場合よりも制作時間の平均は短かった。また、折り図、提案システム共に被験者全てにおいて失敗なく制作できた。折り図を用いた場合の方が模倣制作に要する時間が短くなった原因として、「家」の模倣制作に紙の反転が必要でなく、折り操作の指示と折り紙との対応付けが容易であったためであると考えられる。

「つるの基本形」、「家」共に、提案システムを用いた場合の方が折り紙の形状の誤差が大きかった。しかし、折り図を用いた場合の最大の部分形状の誤差の平均と比較して小さく、折り紙作品の形状を模倣できていることが示唆される。

「つるの基本形」において制作時間が短縮され、「家」においても失敗なく模倣制作を行えたことから、提案システムが有効であったことが示唆される。また、空間的な折り操作によって、折り図と折り紙との対応付けが困難な場合において、より提案システムの有用性が発揮される事が期待される。

第5章 おわりに

本研究では、折り紙作品の模倣制作時に、操作の補助となる情報を重畳提示するシステムを提案した。事前の処理として、バネ質点系を用いた折り操作のシミュレーションにより、折り操作毎の折り紙の形状データを生成した。支援時には、折り紙に印刷したマーカを計測し、マーカの位置姿勢情報を取得した。取得したマーカの位置姿勢情報を、折り紙の面の位置姿勢情報として扱い、事前に生成した折り紙データ群の面の位置姿勢情報と比較し、現在の状態を推定した。推定された状態と取得した情報から折り操作の指示の重畳表示を行い、折り操作を教示した。

提案したシステムの有用性を確認するために被験者実験を行った。実験では、二種類の折り紙作品に対し、従来の折り図を用いて折り紙作品を模倣制作する場合と、提案システムを用いて折り紙作品を模倣制作する場合における、完成に必要な時間と制作された作品の形状、折り操作を理解できなかった回数を比較した。完成に必要な時間に関しては、一種類の折り紙作品で提案システムを用いることで時間が短縮された。また、状態推定に誤りがなければ、提案システムを用いることで、二種類の折り紙作品の全ての折り操作を理解できることが確認された。

提案システムを用いることで、特に折り図を用いて製作すると折り紙との対応付けが困難な折り紙作品において、折り操作の教示が効果的であることが示唆された。提案システムの手法の汎用性を高めることで、紙や布を変形させる操作の教示が可能となる事が期待される。

謝 辞

本研究は、大阪大学基礎工学部で行ったものである。

本研究を行うにあたり、研究の進捗報告に際して多大なるご指導を頂き、本論文の添削指導をしていただきました。大阪大学 大学院基礎工学研究科 大城理教授に深く感謝するとともに、厚く御礼を申し上げます。研究テーマの選定にあたって数多くのアドバイスを頂き、進捗状況も気にかけてくださいました。大阪大学 大学院基礎工学研究科 井村誠孝准教授に心からお礼を申し上げます。また、研究の方向性に多くのご助言を頂き、論文の執筆に関しても詳細にご指導頂きました。大阪大学 大学院基礎工学研究科 吉元俊助教に深く感謝致します。

また、普段の研究室生活において様々なアドバイスや暖かい言葉を頂きました。大城研究室の先輩方である井手口裕太氏、加藤雄樹氏、團原佑壮氏、長坂信吾氏、中藤寛己氏、豆野裕信氏、和田章宏氏、加藤高浩氏、上西健太氏、川口純輝氏、古澤大樹氏に感謝致します。

そして、議論を交わし、知識を共有することで共に切磋琢磨してきた同期の加藤弘樹氏、武村浩志氏、日夏俊氏に感謝致します。

本研究における被験者実験は、基礎工学研究科における人を対象とした研究に関する倫理委員会の承認 (26-12) を得て行ったものである。

参考文献

- [1] 及川茂. 海外事情 最近の欧文による浮世絵研究文献 (2). 浮世絵芸術, No. 157, pp. 83–85, 2009.
- [2] 小川鑛一. けん玉による遊びのサイエンス. 人間工学, Vol. 40, No. Supplement, pp. 37–45, 2004.
- [3] 北岡一道. 折り紙と折る文化. 仁愛女子短期大学研究紀要, No. 36, pp. 59–64, 2004.
- [4] 岩崎和博. 折り紙の文化. 紙パ技協誌, Vol. 68, No. 8, pp. 938–939, 2014.
- [5] 丸山真名美. 立体イメージの形成: 折り紙を使っての心理学的研究. 若手イメージ研究者のためのブラッシュアップセミナー予稿集, pp. 76–79. 若手イメージ研究者のためのブラッシュアップセミナー運営委員会, 2013.
- [6] 山崎賢人, 柴田史久, 木村朝子. 複合現実感技術を用いた商品物流における仕分け作業支援. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 3, pp. 413–422, 2014.
- [7] 元川洋一, 斎藤英雄. ギター演奏支援のための構造特徴追跡を利用したマーカレス AR 表示. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 2, pp. 267–277, 2008.
- [8] 徳盛太一郎, 伊佐元希, 遠藤聡志, 赤嶺有平, 當間愛晃, 山田孝治. エッジベース追跡を用いた折り紙作業支援 AR システムの構築. 情報科学技術フォーラム講演論文集, Vol. 10, No. 3, pp. 317–318, 2011.
- [9] 後藤道彦, 植松裕子, 斎藤英雄, 仙田修司, 池谷彰彦. 作業空間への教師ビデオ重畳表示による AR 支援システム. 画像電子学会誌, Vol. 39, No. 6, pp. 1108–1120, 2010.
- [10] 田中健太, 木原康之, 横小路泰義. 人間の直接教示動作の統計的性質に基づいた折り紙ロボットの目標軌道とセンサフィードバック則生成法. 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 6, pp. 685–695, 2009.
- [11] 武井健三. 折り紙フラクタルによる対称図形の構成. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 93, No. 482, pp. 45–52, 1994.

- [12] 神谷哲史. 創作アイデアの宝箱 神谷流創作折り紙に挑戦!, pp. 108–127. ソシム株式会社, Tokyo, 2010.
- [13] 島貫博, 加藤ジェーン, 渡邊豊英. 展開図を用いた折り紙操作過程における手順毎の折り方構成. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 102, No. 55, pp. 71–78, 2002.
- [14] Toshikazu Kawasaki. On the relation between mountain-creases and valley-creases of a flat origami. In *Proceedings of the 1st International Meeting of Origami Science and Technology*, pp. 229–237, 1989.
- [15] 横山卓弘, 高井昌彰. 厚さを持った折り紙シミュレーションとその評価. 情報処理学会研究報告, Vol. 2000, No. 115, pp. 19–24, 2000.
- [16] 古田陽介, 木本晴夫, 三谷純, 福井幸男. マウスによる仮想折り紙の対話的操作のための計算モデルとインタフェース. 情報処理学会論文誌, Vol. 48, No. 12, pp. 3658–3669, 2007.
- [17] 木下泰宏, 渡邊豊英. 折り紙のシルエットを用いた折り操作推定手法の提案. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 109, No. 64, pp. 117–122, 2009.
- [18] 三谷純. 2次元バーコードを用いた紙の折りたたみ構造の認識とそのモデル化. 情報処理学会論文誌, Vol. 48, No. 8, pp. 2859–2867, 2008.
- [19] Hirokazu Kato and Mark Billinghurst. Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system. In *Augmented Reality, 1999.(IWAR'99) Proceedings. 2nd IEEE and ACM International Workshop on*, pp. 85–94, 1999.
- [20] Martin A Fischler and Robert C Bolles. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, Vol. 24, No. 6, pp. 381–395, 1981.
- [21] 加藤博一. 拡張現実感システム構築ツール ARToolKit の開発. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 101, No. 652, pp. 79–86, 2002.