

2009年度 卒業論文

飛び出す仕掛け絵本における
制作支援に関する研究

指導教員：渡辺 大地 講師

メディア学部 ゲームサイエンスプロジェクト
学籍番号 M0106023
池田 友美

2009年度 卒業論文概要

論文題目

飛び出す仕掛け絵本における
制作支援に関する研究

メディア学部

学籍番号：M0106023

氏名

池田 友美

**指導
教員**

渡辺 大地 講師

キーワード

飛び出す絵本、しかけ絵本、折り紙建築、
ばねモデル、有限要素法

飛び出す絵本とは、本を開くことでページに仕込まれている仕掛けが立体的に飛び出し、閉じることで飛び出した仕掛けがもとのページに収まる本のことをいう。2次元である紙が3次元に飛び出して見えるので迫力があり、また動きがあることから大人から子供まで幅広く親しまれている。近年では紙が飛び出す仕掛けだけでなく、本の内側に挟まれている紙を引っ張ると紙が動いたり、仕掛け同士が積み重なっていることでより飛び出して見えるなど多彩な仕掛けが盛り込まれている。絵本の仕掛けとなる部分は立体的な動きを伴うため、動きを予測して制作するのは初心者にとっては困難である。仕掛けの動きを考慮したポップアップカードの設計や絵本のシミュレートの研究はされているが、絵本特有のプルタブを用いた仕掛けや仕掛けの積み重ね表現についてはなされていない。3D上で仕掛けを設置し、ページをめくるアニメーションを実現することでより表現の幅が広がり、支援につながるのではないかと考えた。本研究では、飛び出す絵本の制作を支援することを目的とし、絵本でよく用いられている仕掛けの積み重ねとプルタブ仕掛けの設計、またページの動きとともに連動する仕掛けのアニメーションを確認することができるツールを制作した。仕掛けの動作を表現するために、仕掛けを構成している頂点間にばねモデルを設定し、有限要素法という解析法を用いて頂点の移動後の位置を計算し、移動を行った。また有限要素法では確定することができない頂点においては、各頂点間の距離が変わらないこと、頂点が同じ平面上に存在することを考慮して幾何的計算を用いて計算した。これにより、ある頂点が移動するとともに、ほかの頂点が距離を保ちながら移動することで仕掛けの動作を表現した。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景	1
1.2	論文構成	4
第2章	飛び出す絵本	5
2.1	90度型	5
2.2	180度型	6
2.3	プルタブ型仕掛け	8
第3章	仕掛けの構造と開閉アニメーション手法	9
3.1	180度を開くときの動作条件	9
3.2	仕掛けの積み重ね	11
3.3	プルタブ型仕掛け	12
3.4	開閉アニメーション	14
第4章	実装と考察	23
4.1	実装	23
4.1.1	基本仕掛け配置	26
4.1.2	プルタブ型仕掛け	29
4.1.3	仕掛け積み重ね	29
4.1.4	開閉アニメーション	30
4.2	考察	33
第5章	まとめ	34
	謝辞	35
	参考文献	36

目 次

1.1	飛び出す絵本の例	2
1.2	90 度型折り紙建築の例	2
1.3	180 度型折り紙建築の例	2
2.1	90 度型の例	6
2.2	180 度型の例	7
2.3	仕掛け重ねの例	7
2.4	プルタブ仕掛けの例	8
3.1	テント型仕掛けの例	10
3.2	V 字型仕掛けの例	10
3.3	積み重ね型仕掛けの例	11
3.4	仕掛け積み重ね	12
3.5	プルタブ仕掛け	13
3.6	プルタブ型仕掛けの接続	14
3.7	テント型仕掛けの例	16
3.8	各頂点の接続	16
3.9	要素の 1 つの例	17
3.10	平面上に頂点が存在する場合の例	20
3.11	平面 efgh について注目した図	21
3.12	平面 ijfe について注目した図	22
4.1	ツール使用手順フローチャート	24
4.2	テント型仕掛け設置の例	26
4.3	V 型仕掛け設置の例	27
4.4	仕掛け移動の例	28
4.5	複数仕掛けの例	28
4.6	プルタブ型仕掛け設置の例	29
4.7	仕掛け積み重ね設置の例	30
4.8	テント型の例	31
4.9	V 字型の例	31

4.10 複数の仕掛けを設置した場合の例	32
4.11 プルタブ型の例	32
4.12 積み重ね型の例	33

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景

飛び出す絵本とは、ページを開くと折りたたまれている紙が立体的に飛び出し、ページを閉じると平面に折りたたむことができる本である。本を開閉することで仕掛けに動きが生じるため、子供から大人まで幅広く親しまれている [1][2]。近年では紙が飛び出す仕掛けだけでなく、本の内側に挟まれている紙を引っ張ると紙が動いたり、仕掛け同士が積み重なっていることでより飛び出して見えるなど多彩な仕掛けが盛り込まれている [3][4]。日本では 2004 年頃からロバート・サブダ氏が手がけた『不思議の国のアリス』 [4] が発売されたことで、飛び出す絵本ブームとなり、多くの人に関心を持つようになった。図 1.1 は飛び出す絵本の例 [5][6] である。



図 1.1: 飛び出す絵本の例

飛び出す絵本を制作するには、立体的な動きを伴う仕掛け部分が重要となる [7][8][9]。しかし、平面の紙の組み合わせから立体になる動きを予想するには、飛び出す絵本の仕組みを理解しなければならないため、初心者には制作が困難である。そのため、飛び出す絵本の飛び出す動きが生じる仕掛けについて、様々な研究が進められている。茶谷 [10] は、折り紙の手法を応用して1枚の紙から建築物や動物など、様々な立体的な造形物を切り起こすカードを考案した。これを折り紙建築 [11][12][13] と呼ぶ。折り紙建築は主にポップアップカードに用いられる表現である。カードを開く角度によって表現が異なり、90度を開くものや180度を開くものがある。図 1.2 と図 1.3 は90度型と180度型折り紙建築の例である。

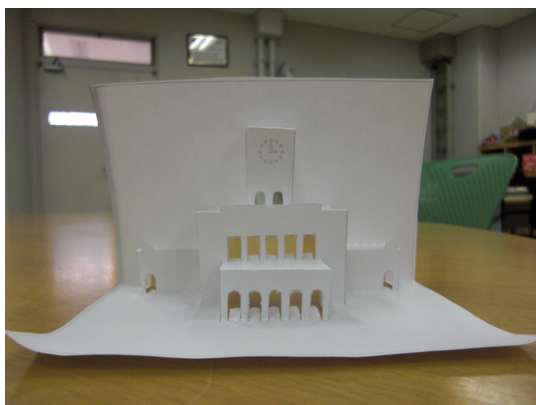


図 1.2: 90度型折り紙建築の例

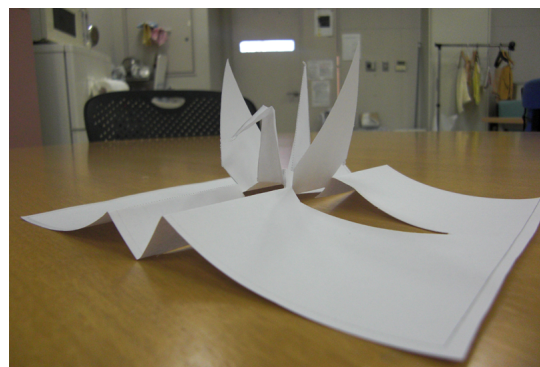


図 1.3: 180度型折り紙建築の例

三谷ら [14] は、90 度型ポップアップカードの制作支援として、計算機によるボクセル表現を用いた設計手法や、平面多角形の集合による折り紙建築モデルの表現と設計手法を提案している。また藤原ら [15] は、切り起こし 180 度型の折り紙建築において、左右対称のものに限りオブジェクトから型紙を生成することに成功している。これらの研究では 1 枚の台紙から切り取り、立体となる折り紙建築を対象としており、飛び出す絵本のように台紙の上に複数の紙を設置する手法とは異なっている。しかし折り紙建築の原理は、飛び出す絵本やポップアップカードの仕掛けと同じ原理で動きを表現することができる。

飛び出す絵本の仕掛けに関する研究も進められており、180 度 V 字型における飛び出す絵本のシミュレートに関する研究では、加世田ら [16] が、本を開く動きからページに貼り付けてある V 字の仕掛けが立体的になる動きのシミュレートに成功している。また岡村ら [17] の、ポップアップカードデザインの制作支援における研究では、V 字型と立方体に限定した立体部分を実際に設計し、型紙を制作するシステムを提案した。これらの研究では飛び出す絵本に多く用いられているプルタブを使用した仕掛けや、仕掛け同士を重ね合わせる機能に関しては実現されていない。

本研究では、飛び出す絵本の制作支援を目的としたツールを制作した。飛び出す絵本に多く見られる仕掛け同士を積み重ねる機能と、プルタブ型仕掛け機能のデザイン及び絵本の開閉時に発生する仕掛け部分のアニメーションを実装した。仕掛けのアニメーションにおいては有限要素法とばねモデルを用いて、積み重ねの仕掛けとプルタブ型仕掛けのアニメーションを再現した。仕掛けを構成している頂点間にばねモデルを設定し、有限要素法を用いて頂点の移動後の位置を計算した。また有限要素法では確定することができない場合の頂点においては、各頂点間の距離が変わらないこと、頂点が同じ平面上に存在することを考慮して幾何的計算を用いて計算し、頂点の位置を求めた。結果として、実際の基本型である 2 種類の仕掛けと、プルタブ型、積み重ね型仕掛けの開閉時の動きを表現することができた。仕掛けの動作を表現したことで、初心者には困難である仕掛けの動きを

予測することが容易になった。また飛び出す絵本に多く用いられるプルタブ型と積み重ね型仕掛けを再現することで、より表現の幅が広がった。本研究では、180度見開きの状態で立体になる180度型を対象とする。

1.2 論文構成

本論文は、本章を含めて全5章で構成する。第2章で飛び出す絵本の主な構造の説明、第3章で仕掛けの積み重ね、プルタブ機能について述べる。第4章では提案手法をもとに検証と考察を行い、最後に第5章で本研究のまとめと今後の展望について述べる。

第 2 章

飛び出す絵本

飛び出す絵本、またはしかけ絵本とは、本を開くことでページに仕組まれている仕掛けが立体的に飛び出し、閉じることで飛び出した仕掛けがもとのページに収まる本のことをいう。一般的な飛び出す絵本の構造は、折り紙建築のように一枚絵の紙を切り込むのではなく、ページの上に仕掛けとなる紙を複数設置することで成り立っている。本章では、飛び出す絵本において主に用いられる仕掛けの種類について述べる。様々な仕掛けがあるが、ここでは多くの絵本が使用している 90 度型、180 度型とプルタブ型の 3 つに分けて説明する。

2.1 90 度型

本を 90 度を開いたときに、形状が立体になる仕掛けが 90 度型である。図 2.1 は 90 度型仕掛けの例である。紙に切れ目を入れる、もしくは紙を張り付け、2 つ折りにしたカードを開くと起き上がる構造であり、動きも予想しやすいため非常に簡単に制作することができる。1 枚の紙から成り立っているため、形状をコンパクトに折りたたむことができるので主にポップアップカードに多く用いられる手法である。

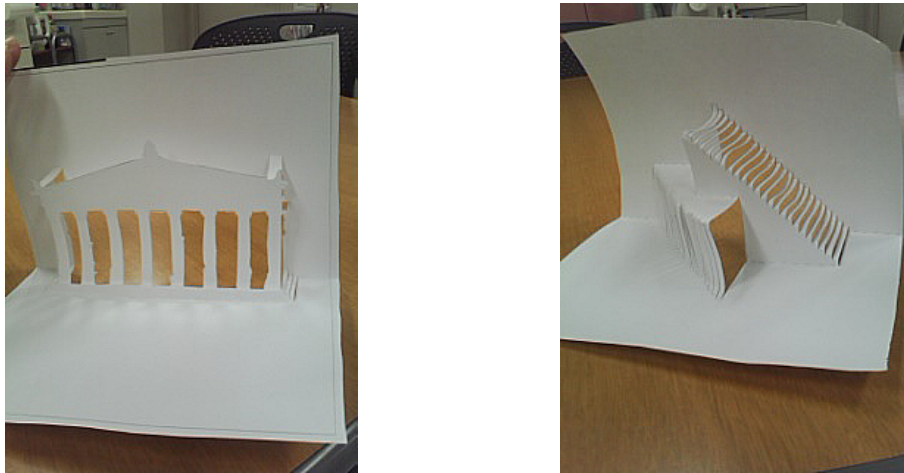


図 2.1: 90 度型の例

2.2 180 度型

本研究で主に扱うのがこの 180 度型である。図 2.2 は 180 度型仕掛けの例である。本を 180 度を開いたときに仕掛けの形状が立体形状になる仕組みであり、左右のページ両方に接地していることが条件である。通常しかけ絵本、飛び出す絵本と呼ばれる本はこの仕掛けを多用している。

飛び出す仕掛けの基本の原理は 2 つである。ひとつはテント型と呼び、本の中心にテントのように被さる仕掛けである。ふたつめは V 字型と呼び、ページの中に V 字に設置する仕掛けである。図 2.2 の (a) はテント型、(b) は V 字型の例である。

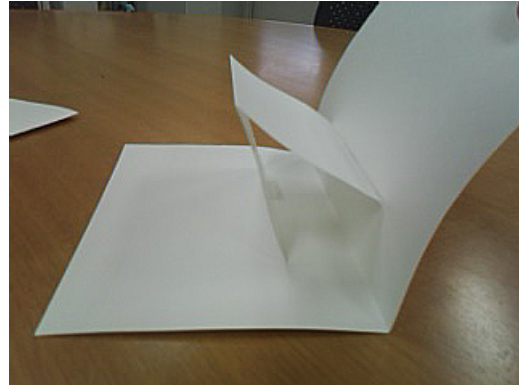


図 2.2: 180 度型の例

複雑に見える仕掛けはこの2つの原理を応用して成り立っている。またこれらの仕掛けをいくつも重ね合わせたり、組み合わせることでより立体的でダイナミックな表現が可能となるため、飛び出す絵本ではよく用いられている。図 2.3 は仕掛けを積み重ねた例である。ただし、仕掛けを積み重ねると厚みが増してしまうため、ポップアップカードではあまり用いられない。

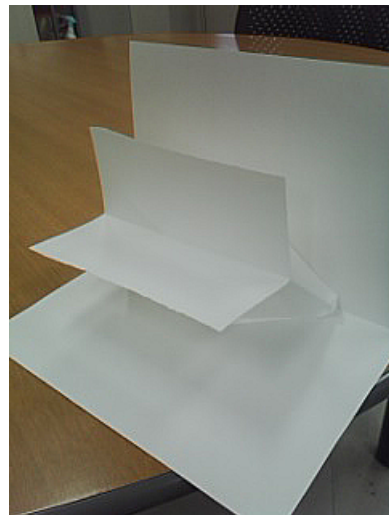


図 2.3: 仕掛け重ねの例

2.3 プルタブ型仕掛け

飛び出す絵本には立体に飛び出す仕掛け以外にも様々な仕掛けがある。その1つがプルタブを用いる仕掛けである。プルタブを用いた仕掛けとは、プルタブが動作を生じる仕掛けである。プルタブ仕掛けには2種類あり、ひとつは本を読むユーザーがプルタブを動かして遊ぶものである。ふたつめは次のページと連動し、ページをめくることでプルタブに接続した仕掛けが連動して動く仕掛けである。本研究では後者の仕掛けを対象とし、以下この仕掛けについてプルタブ型仕掛けと称する。

プルタブ型仕掛けは、飛び出す絵本において簡単な構造で仕掛けに動きをつける手段として多く活用されている。飛び出す絵本は表紙をつけるため、表紙とページの間や1ページに紙が重なることでのスペースがある。このスペースにプルタブを仕込み、活用している。仕掛けを設置する台紙の紙が1枚であるポップアップカードにはあまり使わない。図2.4はプルタブ仕掛けの例である。

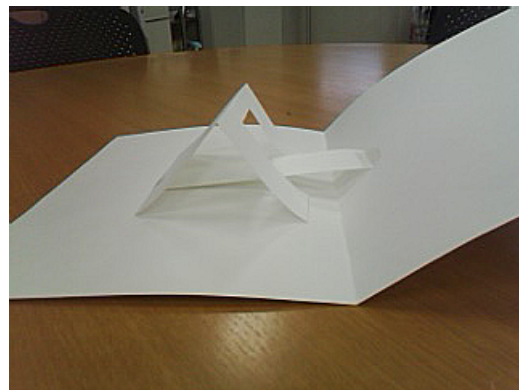


図2.4: プルタブ仕掛けの例

第 3 章

仕掛けの構造と開閉アニメーション 手法

本章では仕掛けの構造の解説と、仕掛けの積み重ねによる表現とプルタブ型仕掛けの機能、および制作支援のための開閉アニメーション手法について述べる。

3.1 180度を開くときの動作条件

本を180度開閉した際に、基本の型であるテント型とV字型のそれぞれの仕掛けが動く構造を述べる。

180度にたためる条件として、基本的に左右のページに仕掛けが接触していることがあげられる。仕掛けが動くのは両ページのどちらかに接続していることが条件である。よってテント型やV字型などのすべての仕掛けは必ずページと接続している稜線が存在する。図2.5はテント型の例である。4角形 $ABCD$ の辺 AB 、辺 CD をそれぞれ2等分した線を辺 EF とし、折り目とする。辺 EF を山折にし、本の折り目をまたぐように設置する。よって左ページには辺 AC 、右ページには辺 BD が接続する形になる。図3.1の(b)は(a)を台紙である本の下部から水平にみた図である。仕掛けの折り目となっている点を F 、左右のページに接地している点を B 、 C とする。仕掛けが起き上がる条件として、辺 BF と辺 FC を足した長さが、頂点 B 、 C 間よりも長いことが条件となる。

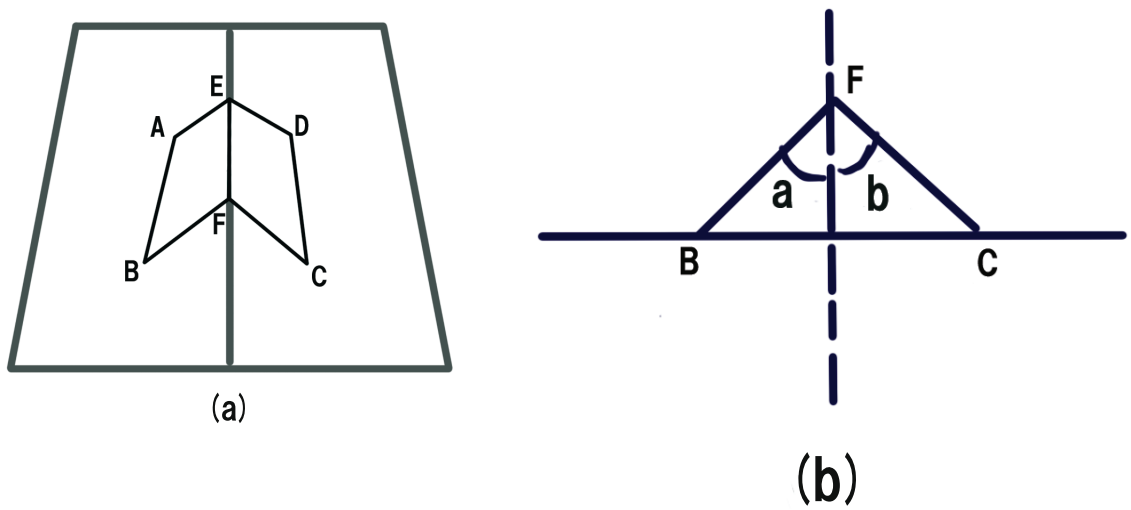


図 3.1: テント型仕掛けの例

図 3.2 は V 字型の図である。左ページには辺 BC 、右ページには辺 CD が接続する形となる。(b) は (a) を真上からみた図である。辺 BD のなす角度 a と角度 b は角度 c と角度 d よりも小さいことが条件である。

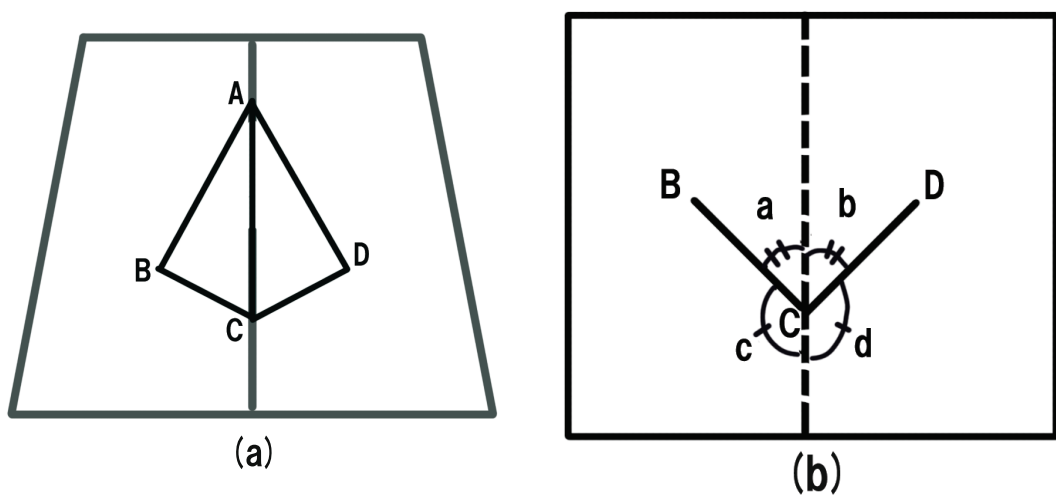


図 3.2: V 字型仕掛けの例

このように、基本的に仕掛けは必ずページと接続する部分が存在するが、仕掛けを積み重ねた場合、ページと一切接触せず、仕掛けだけに接触する仕掛けが発生する。

3.2 仕掛けの積み重ね

飛び出す絵本では、仕掛け同士を積み重ねることで手前に動きが生じ、より迫力のある表現が可能である。様々な種類が存在するが、本研究では3つの柱に平面を設置した仕掛けを対象とする。図3.3と図3.4は仕掛けの積み重ねの例である。

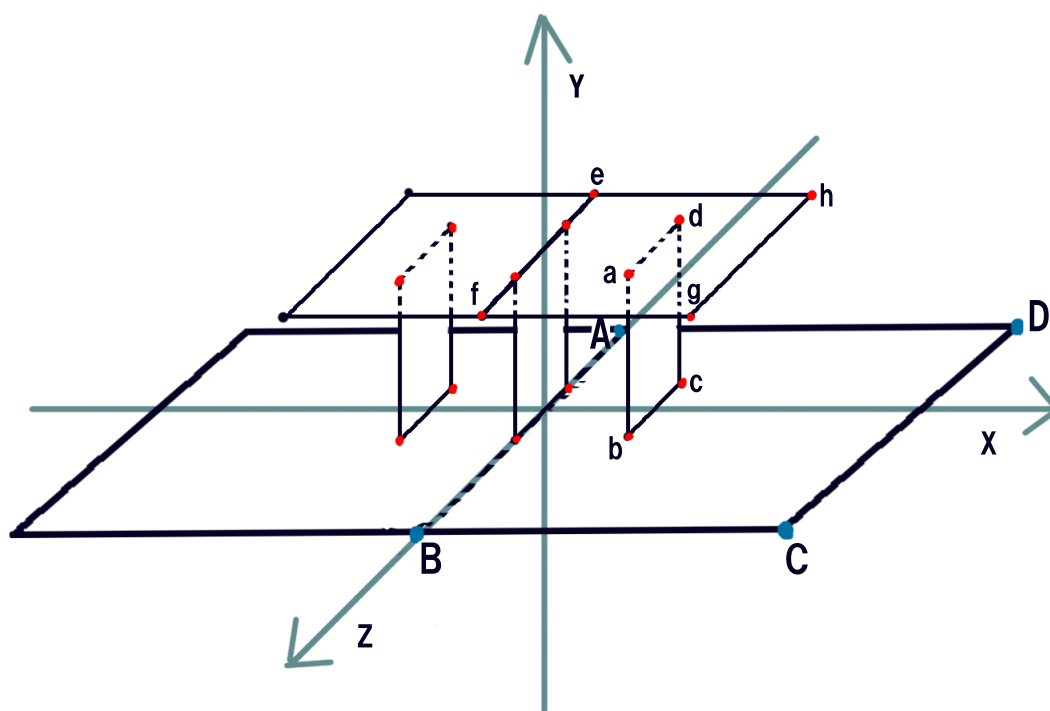


図 3.3: 積み重ね型仕掛けの例

図3.3の辺 AB は台紙である本の中心の折り目である。また、辺 ef は本の折り目と平行である。本の右ページである面 $ABCD$ を開閉すると、面 $ABCD$ 上にあ

る頂点 b 、 c が移動する。これにより持ち上げられた面 $abcd$ が面 $efgh$ を動かす。面 $efgh$ は平面 $ABCD$ に対して平行に移動する。図 3.4 は図 3.3 の仕掛けを積み重ねた様子である。

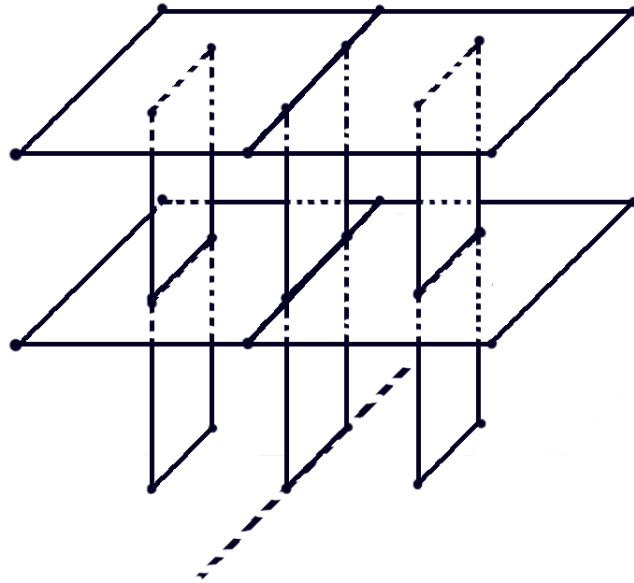


図 3.4: 仕掛け積み重ね

積み重ねることにより手前に仕掛けが飛び出すため、より迫力があるように見せることができる。

3.3 プルタブ型仕掛け

プルタブを用いた仕掛けでは、前のページから次のページの仕掛けに接続することで動きが生じる。またこの方法を使用することで、テント型を折り目である中心をまたぐことなく設置することができる。図 3.5 はテント型仕掛けにプルタブを用いた仕掛けである。図 3.5 の (a) がテント型の仕掛け、(b) がプルタブ部分である。(a) のテント型に (b) のプルタブ部分を接続する。辺 pq は辺 AB 上に接続す

る。テント型 (a) の1辺である辺 AB 上にプルタブ部分 (b) の1辺である辺 pq を接続する。また辺 CD にはプルタブ部分は接続しない。プルタブの辺 rs は右ページと接続する。これにより右ページを開くとテント型の仕掛けの左半分が起き上がる仕組みが出来上がる。ただし、(b) のプルタブの長さは、(a) のテント型の1辺より長くする必要がある。また頂点 t, u は辺 OP との交点で、辺 pt 、辺 qu は辺 ta 、辺 ur よりも長くしなければならない。

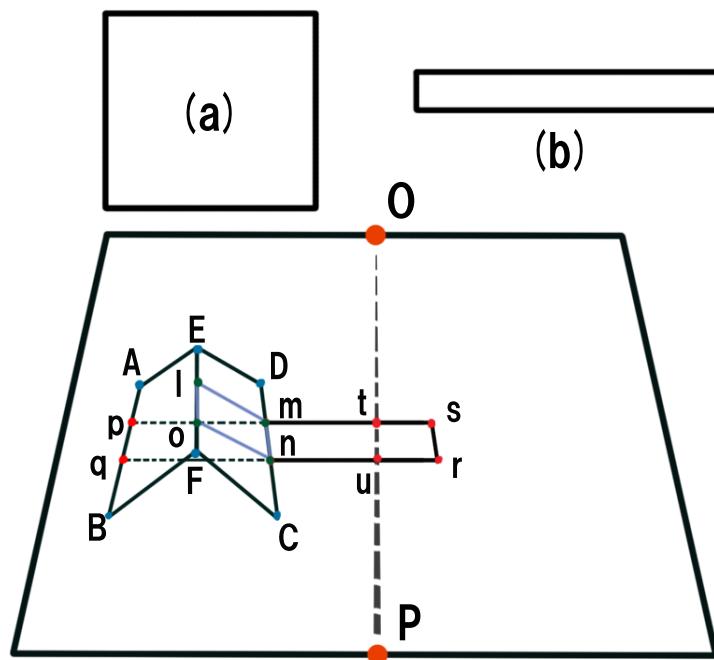


図 3.5: プルタブ仕掛け

図 3.5 の左ページにはテント型仕掛けが設置されており、辺 AB が面 $pqrs$ の1辺である辺 pq と接続している。また、辺 CD は左ページに固定してある。平面 $EFCD$ 上にある平面 $lmno$ は切り取られている。右ページ上にある頂点 s, r がページの折り目である辺 OP を中心に回転すると頂点 p, q が左に平行移動する。よって、ページの左側に設置してあるテント型仕掛けの辺 AB が連動して平行移動する。

辺 CD は固定してあるので、辺 AB が移動すると辺 EF も連動して移動する。図 3.6 は、図 3.5 の右ページを垂直にし、台紙である本の下部から水平にみた図である。辺 Fq と辺 Fn がテント型仕掛け、辺 qr がプルタブ部分である。形状を生成した際、頂点 r 、 s が回転移動をすると、面 $PQRS$ は面 $lmno$ を通りすぎるため、図 3.6 の辺 qr のようになる。

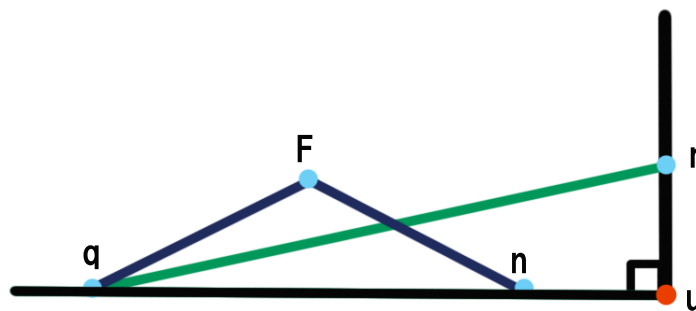


図 3.6: プルタブ型仕掛けの接続

プルタブ型仕掛けの開閉アニメーションを行う際、移動後の頂点の位置をそれぞれ計算で求め、頂点の移動を行う。台紙である本の右ページが辺 OP を軸として回転すると、頂点 s 、 r の位置が変化する。図 3.6 は、図 3.5 の右ページが辺 OP を軸として 90 度回転したときの図である。頂点 r が辺 OP を軸として回転しても辺 ru と辺 qr の距離は変化しないので、辺 uq の距離を求めることができる。よって、常に頂点 q の位置が求まる。頂点 n は常に固定であり、辺 Fn と辺 Fq の距離は変化しないため、頂点 q の位置から頂点 F の位置を求めることができる。同様にして図 3.5 の頂点 p と頂点 E についても求めることができ、頂点 r 、 s が回転することで位置が変化する頂点をすべて求めることが可能である。

3.4 開閉アニメーション

本節では、ページの開閉アニメーションについて述べる。ページである台紙が開閉することで、設置してある仕掛けが連動して動くアニメーションを表現する。

台紙であるページとページ上に設置してある仕掛けはともにページの折り目を軸として180度に回転している。台紙の右ページは右端の2頂点が、仕掛けは右ページ上にある頂点が回転する。また、左ページは完全に固定であり、右ページのみが回転する。本が開閉動作をすると、ページ上に設置してある仕掛けが連動して動くため、本が動くたびに仕掛けの位置を求めなければならない。よってページが動くたびに仕掛けの頂点の位置を求める。仕掛けの頂点は頂点同士の距離は常に一定であるために、トラス構造を用いた有限要素法の解析手法 [18][19] を用いた。本研究では仕掛けを構成している面の各頂点間にばね要素を設定し、有限要素法を用いて計算を行うことで仕掛けの動きを表現する。

有限要素法とは数値解析法の1つで、誤差を含む近似解を求めるものである。ある複雑な形状を持つ物体を、単純な形状の要素に分割し、その1つの要素の特性を方程式で表す。これらの連立方程式の解を求めることによって、全体の挙動を予測しようとするものである。構造力学の分野で主に発展し、幅広い分野で使われている。

本のページが開閉する動きに伴い、ページと接続している仕掛けも動きを生じる。各頂点間にばねモデルを設定する。仕掛けの辺には、曲げることに對して抵抗はない。頂点間の距離を保つ力学的性質を有するため、動作はばねと同じものとして扱うことが可能である。頂点間の距離を保とうとするので、頂点が移動するたびに連結している頂点もそのたびに移動する。有限要素法を用いて、拘束点である頂点の移動後変位から、すべての頂点位置を求める。

図 3.7 と図 3.8 はテント型の仕掛けの例である。

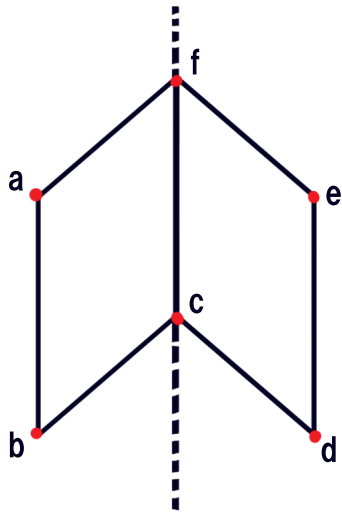


図 3.7: テント型仕掛けの例

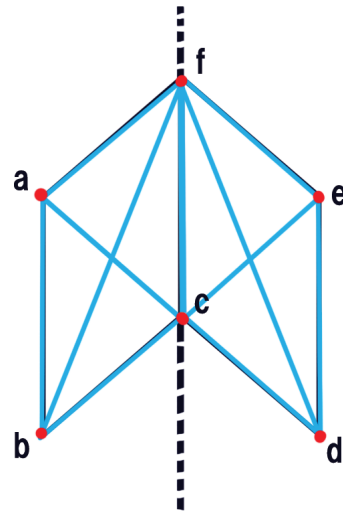


図 3.8: 各頂点の接続

まず台紙である本のページに見立てた直方体の上に、仕掛けである複数の平面を生成する。次に拘束点を設定する。拘束点には2種類ある。ひとつは位置が固定され他の節点からの変位を受けても移動しない点。もうひとつは操作などによって外力が働くため、ほかの節点からの外力の影響を受けない点である。よって図 3.7 と図 3.8 の場合、拘束点は両ページに接続している頂点 a 、 b と、頂点 d 、 e の4点 が拘束点となる。各頂点は連結しており、移動しない頂点 a 、 b は固定する。それぞれの仕掛けの頂点を連結し、その頂点間にばねモデルを設定する。頂点 d 、 e が本の折り目を軸として弧を描くように動くと、頂点 c 、 f が他の頂点と接続している辺の距離を保ちながら動く。図 3.8 は各頂点の接続を表したものである。ページが動くと、ページに接触している頂点に変位が生じ、連結している他の頂点に応力が生じる。応力によって頂点は移動するので、移動と応力の算出を繰り返して移動後の頂点の位置を求め、描画することで開閉の動作を表現した。以下の手法を用いて有限要素法による解析を行っている。

1. 全体を構成している要素剛性方程式をそれぞれ立式する。
2. 1で導いたそれぞれの要素剛性方程式を重ね合わせて全体剛性方程式とする。

3. 拘束点による変位拘束条件の処理を加える。
4. 連立方程式を解く。
5. 変位が求まる。

以下に上記の順番で解析法を述べる。図 3.9 は頂点 A 、 B からなる要素の 1 つの例である。

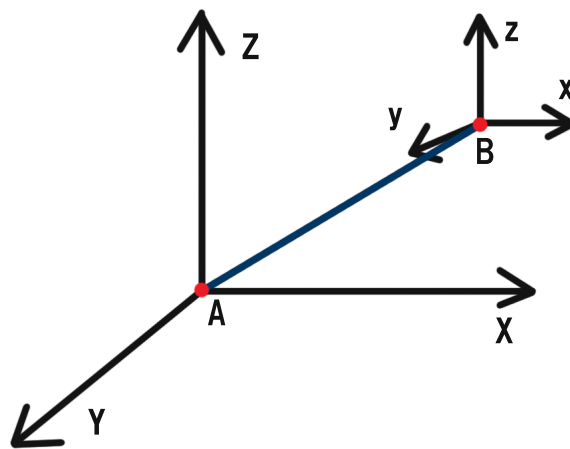


図 3.9: 要素の 1 つの例

1. 全体を構成している要素剛性方程式をそれぞれ立式する。

1 つの要素について以下の方程式が成り立つ。

$$\{\mathbf{f}\} = [K]\{\mathbf{u}\} \quad (3.1)$$

$\{\mathbf{f}\}$ = 節点外力ベクトル、 $[K]$ = 剛性マトリックス、 $\{\mathbf{u}\}$ = 節点変位ベクトルである。平面とは違い、変位や力は 3 方向ベクトルとなるので、要素剛性マトリックスは次元数 6 の正方行列になる。要素は任意の方向を向いているため、変位や力の座標変換を考える必要がある。要素ごとに局所座標軸を定義し、全体座標軸と局所座標軸の方向余弦をとる。

図3.9の頂点 A の節点の力成分と変位成分を $(\overline{f_{xA}}, \overline{f_{yA}}, \overline{f_{zA}})$ 、 $(\overline{u_A}, \overline{v_A}, \overline{w_A})$ 、
頂点 B の節点の力成分と変位成分を $(\overline{f_{xB}}, \overline{f_{yB}}, \overline{f_{zB}})$ 、 $(\overline{u_B}, \overline{v_B}, \overline{w_B})$ とす
る。このときの力と成分の関係は以下の式のとおりである。

$$\begin{Bmatrix} \overline{f_{xA}} \\ \overline{f_{yA}} \\ \overline{f_{zA}} \\ \overline{f_{xB}} \\ \overline{f_{yB}} \\ \overline{f_{zB}} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k & 0 & 0 & -k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k & 0 & 0 & k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \overline{u_A} \\ \overline{v_A} \\ \overline{w_A} \\ \overline{u_B} \\ \overline{v_B} \\ \overline{w_B} \end{Bmatrix} \quad (3.2)$$

全体座標 (X, Y, Z) 、局所座標 (x, y, z) としたとき、方向余弦は以下のように
表す。

	X	Y	Z
x	l_1	m_1	n_1
y	l_2	m_2	n_2
z	l_3	m_3	n_3

このとき、 $l = l_1, m = m_1, n = n_1$ と置き換えると立体での要素剛性マトリッ
クスは式 (3.2) のようになる。

$$[K] = k \begin{bmatrix} l^2 & lm & ln & -l^2 & -lm & -ln \\ lm & m^2 & mn & -lm & -m^2 & -mn \\ ln & mn & n^2 & -ln & -mn & -n^2 \\ -l^2 & -lm & -ln & l^2 & lm & ln \\ -lm & -m^2 & -mn & lm & m^2 & mn \\ -ln & -mn & -n^2 & ln & mn & n^2 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

式 (3.1) を元に、要素を成している2つの節点においてそれぞれ局所座標軸
をとり、要素剛性方程式を立てる。図3.9の頂点 A の節点力と変位を $(f_{xA}$ 、
 f_{yA} 、 $f_{zA})$ 、 (u_A, v_A, w_A) 、頂点 B の節点力と変位を $(f_{xB}$ 、 f_{yB} 、 $f_{zB})$ 、 $(u_B$ 、
 $v_B, w_B)$ とする。このとき式 (3.1) と式 (3.2) から以下の式が成り立つ。

$$\begin{Bmatrix} f_{xA} \\ f_{yA} \\ f_{zA} \\ f_{xB} \\ f_{yB} \\ f_{zB} \end{Bmatrix} = [K] \begin{Bmatrix} u_A \\ v_A \\ w_A \\ u_B \\ v_B \\ w_B \end{Bmatrix} \quad (3.4)$$

2. 1で導いたそれぞれの要素剛性方程式を重ね合わせて全体剛性方程式とする。

立式した要素剛性方程式を重ねていくことで全体剛性方程式とする。式(3.4)の要素剛性マトリックスの各成分が全体剛性マトリックスに組み込まれる場所は以下のとおりである。

$$\begin{array}{l} \begin{array}{cccccc} & 3A \text{ 列} & 3A + 1 \text{ 列} & 3A + 2 \text{ 列} & 3B \text{ 列} & 3B + 1 \text{ 列} & 3B + 2 \text{ 列} \\ 3A \text{ 行} & \left(\begin{array}{cccccc} l^2 & lm & ln & -l^2 & -lm & -ln \\ lm & m^2 & mn & -lm & -m^2 & -mn \\ ln & mn & n^2 & -ln & -mn & -n^2 \\ -l^2 & -lm & -ln & l^2 & lm & ln \\ -lm & -m^2 & -mn & lm & m^2 & mn \\ -ln & -mn & -n^2 & ln & mn & n^2 \end{array} \right) & & & & & \\ 3A + 1 \text{ 行} & & & & & & \\ 3A + 2 \text{ 行} & & & & & & \\ 3B \text{ 行} & & & & & & \\ 3B + 1 \text{ 行} & & & & & & \\ 3B + 2 \text{ 行} & & & & & & \end{array} \end{array} \quad (3.5)$$

3. 拘束点による変位拘束条件の処理を加える。

完全に固定する頂点と操作などで外力が働き自ら動く頂点が拘束点である。これらの条件を加えることで連立方程式を解くことができる。剛性マトリックスの大きさを n 行 n 列、変位拘束点が x 行目の u のとき、行列の x 行と x 列の成分を対角項以外をすべて 0 にし、対角項は 1、外力ベクトルの x 行を 0 にする。

4. 連立方程式を解く。

上記の拘束条件を加えた上で全体剛性方程式から連立方程式を解き、変位を導き出す。

5. 変位が求まる。

以上の手順で変位を求める。また、全体剛性マトリックスが非正則で解が求められない場合については、各頂点間に設定したばねの復元力による変形を行う。

積み重ね仕掛けの場合、仕掛け辺上もしくは平面上に頂点が存在する場合がある。通常、ページに接続している節点が拘束点であるが、積み重ねの場合仕掛けの平面上などの定まらない拘束点が発生する。このとき、幾何的な計算によって拘束点を求める。図 3.10 は平面上に頂点が存在する積み重ねの例である。

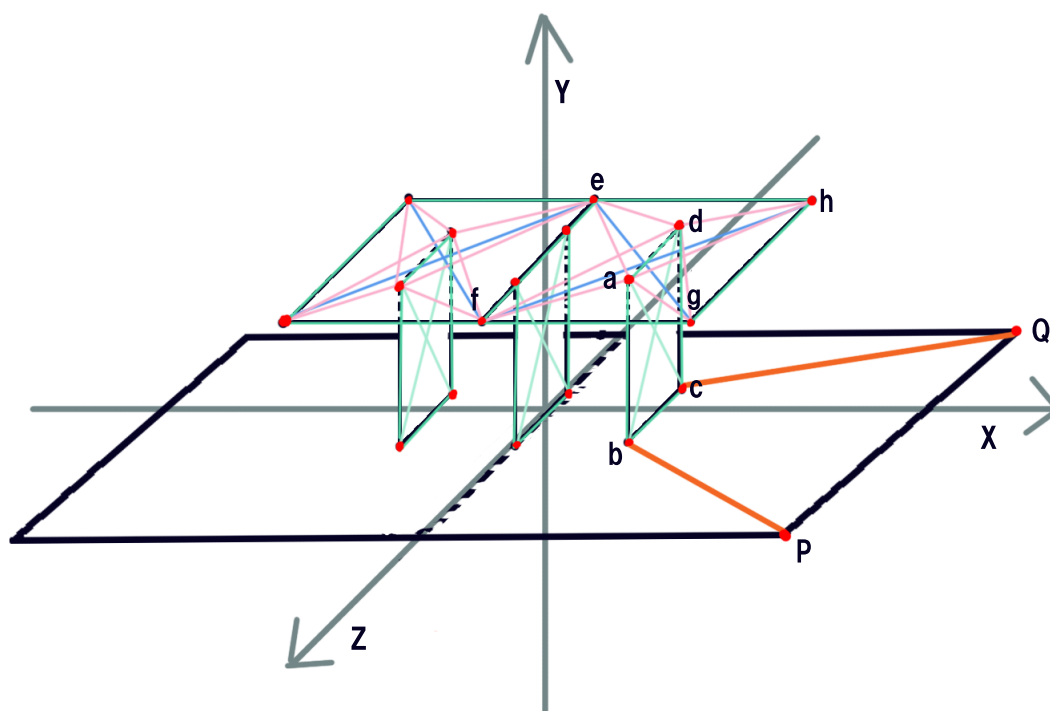


図 3.10: 平面上に頂点が存在する場合の例

図 3.10 において右ページが開閉の動きをする際、点 P 、 Q が折り目を中心に回転することで頂点 bc が回転する。頂点 bc が回転することで面 $abcd$ に動きが生じる。頂点 a 、 d は面 $efgh$ 上に固定してあるので、面 $efgh$ が移動しても頂点 a 、 b

は頂点 e 、 f 、 g 、 h との距離は変わらない。図 3.11 は図 3.10 における面 $efgh$ に注目したものである。

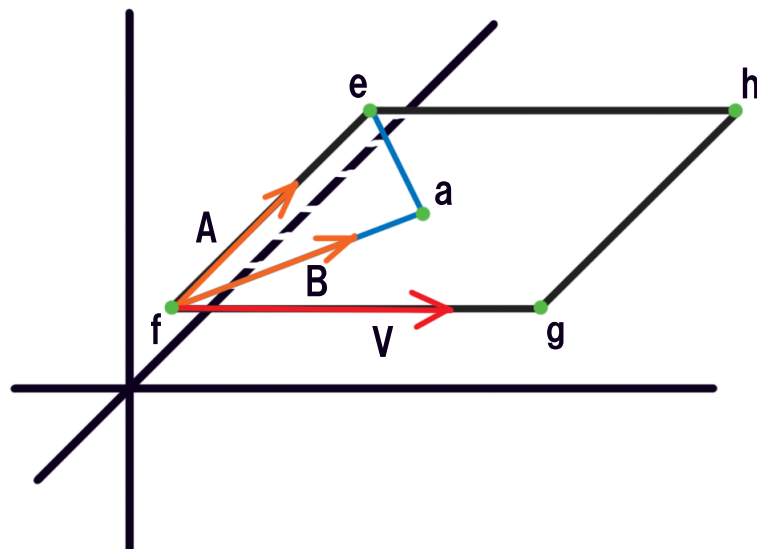


図 3.11: 平面 $efgh$ について注目した図

図 3.11 において頂点 f から頂点 g に向かうベクトルを \mathbf{V} 、頂点 f から頂点 e に向かうベクトルを \mathbf{A} 、頂点 f から頂点 a に向かうベクトルを \mathbf{B} とする。これらのベクトルはすべて平面 $efgh$ 上に存在する。変数を α 、 β としたとき、以下の式が成り立つものとする。

$$\mathbf{V} = \alpha \mathbf{A} + \beta \mathbf{B} \quad (3.6)$$

頂点 a は常に平面 $efgh$ 上で固定であり、位置は変わらない。面 $efgh$ が移動しても頂点 a と頂点 f との距離は変わらないので、変数 α 、 β は常に一定である。式 (3.2) によって面 $efgh$ が移動するたびに \mathbf{V} が求まるので、頂点 a が決まると頂点 g の位置を常に求めることができる。また図 3.10 において、折り目を軸にして頂点 O 、 P が回転するが、折り目が 90 度までとそれ以降で場合分けをして求めて

いる。図 3.12 は図 3.10 において 90 度から 180 度のとき面 $ijfe$ に注目したものである。頂点 k 、 l も式 (3.2) を用いて求めることができる。

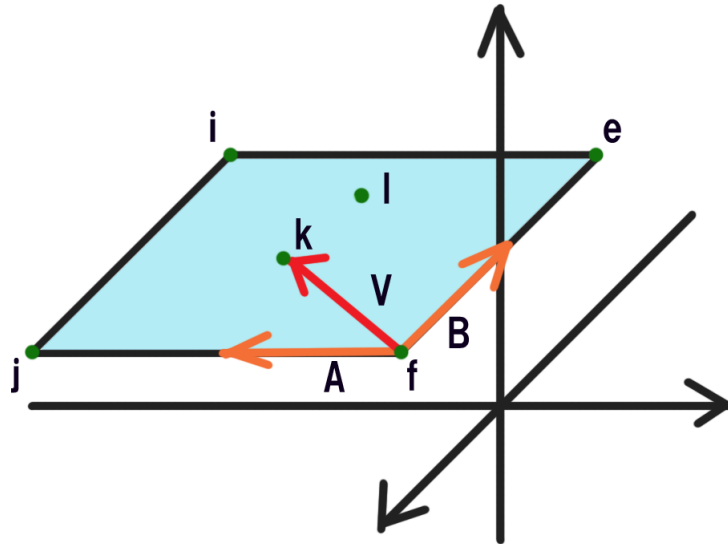


図 3.12: 平面 $ijfe$ について注目した図

第 4 章

実装と考察

本研究では 3DCG ツールキットである Fine Kernel Tool Kit [20] を用いて実装した。本章では、支援ツールの機能の概要と解説を述べる。

4.1 実装

本システムでは、仕掛けを設置し、ページの開閉によるアニメーションを実装した。基本動作はテント型、V字型、プルタブ型仕掛けの設置、編集、また仕掛けの積み重ねの設置である。編集後にページを開くことで仕掛けがどのように動くかを確認することができる。またカメラ移動の機能により、視点を変えることが可能である。図 4.1 はツールの使用手順である。

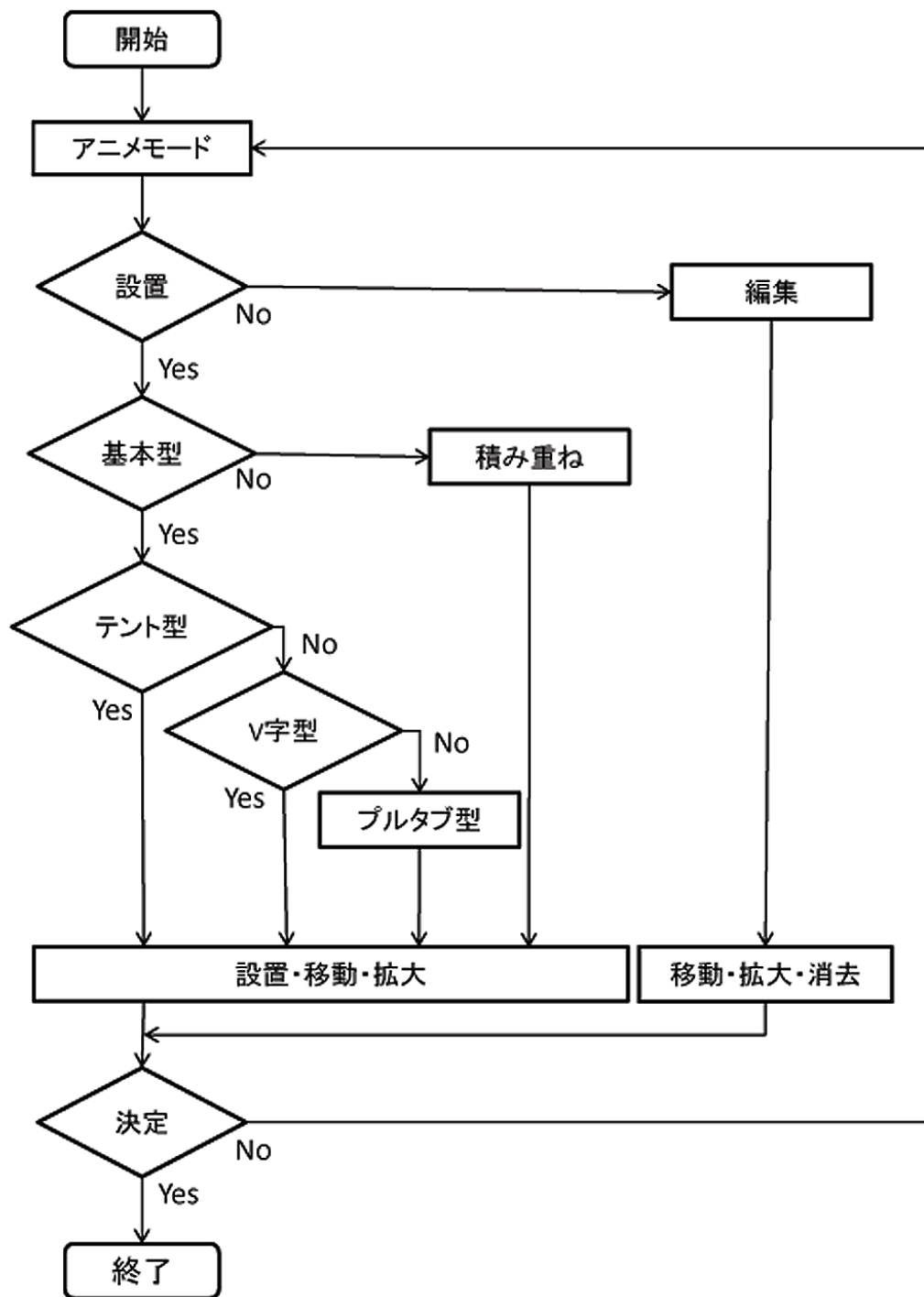


図 4.1: ツール使用手順フローチャート

最初に設置か編集のどちらかを選択する。設置を選択した場合、基本型仕掛けとプルタブ型の設置か積み重ね仕掛けの設置かを選択する。基本型仕掛けを選択した場合、テント型、V字型、プルタブ型の仕掛けの中から選択する。選択した後、create ボタンを押すことで中央に仕掛けが出現する。仕掛けの位置調整、拡大縮小を行い Enter ボタンを押すことで決定する。なお、仕掛けが出現してから Enter ボタンを押すまではページの回転は不可である。決定後としてページの折り目を軸として180度回転の動作を行うことができる。

4.1.1 基本仕掛け配置

基本仕掛けとは、テント型、V字型の2種類である。基本的な仕掛けの配置は、ページの中心に対して対称となるように設置する。図4.2はテント型、図4.3はV字型仕掛けをそれぞれ設置したときの図である。

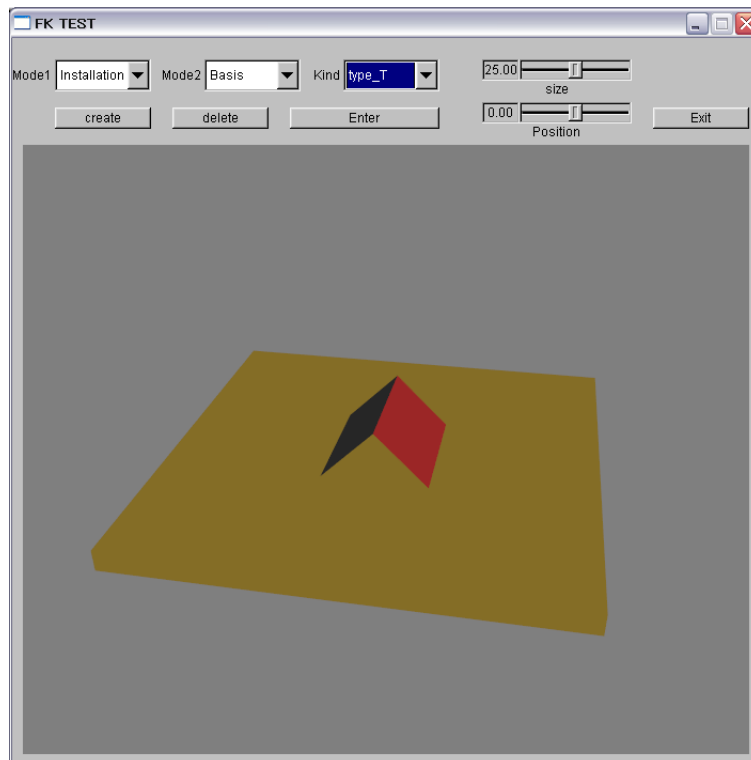


図 4.2: テント型仕掛け設置の例

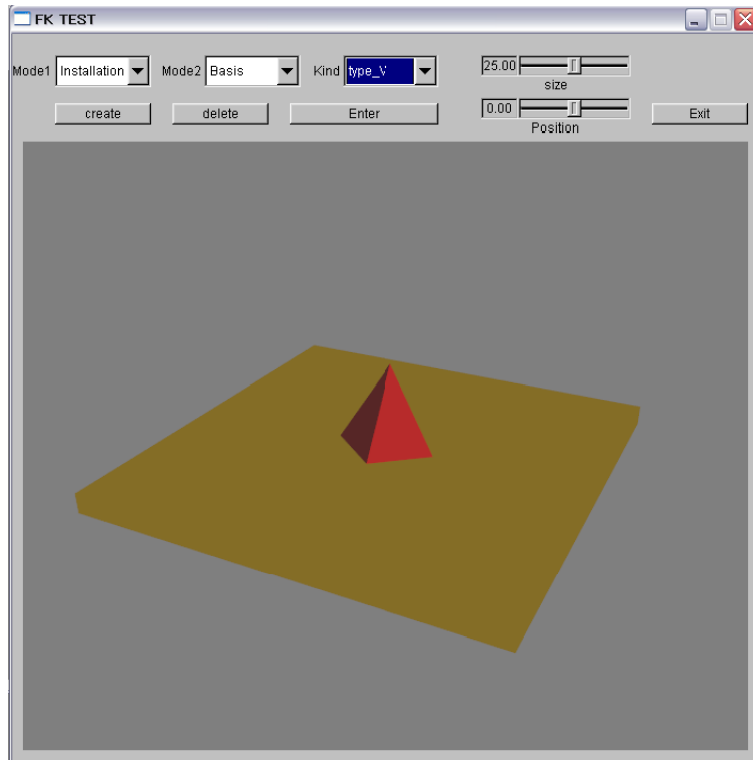


図 4.3: V 型仕掛け設置の例

中央の直方体は台紙である本のページである。本の中心である折り目をまたぐようにして設置する。また、仕掛けは複数設置することや、位置の移動が可能である。図 4.4 は仕掛けを移動した後の様子、図 4.5 は仕掛けを複数設置した際の様子である。

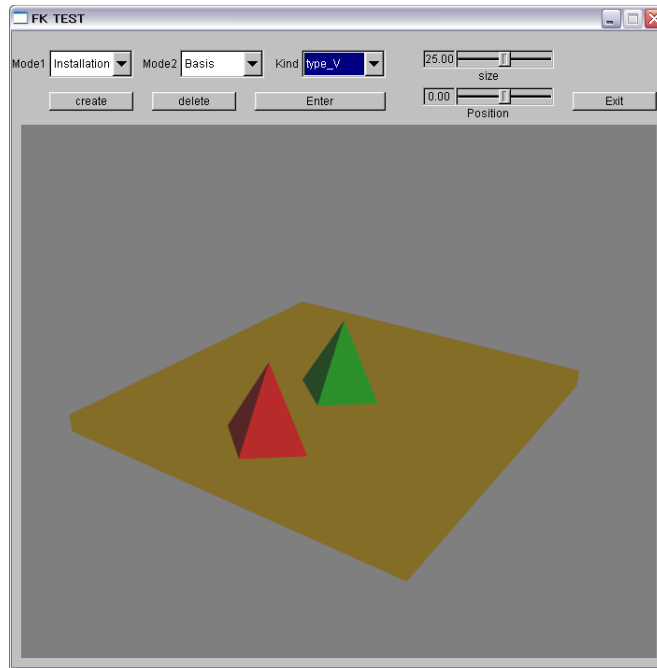


図 4.4: 仕掛け移動の例

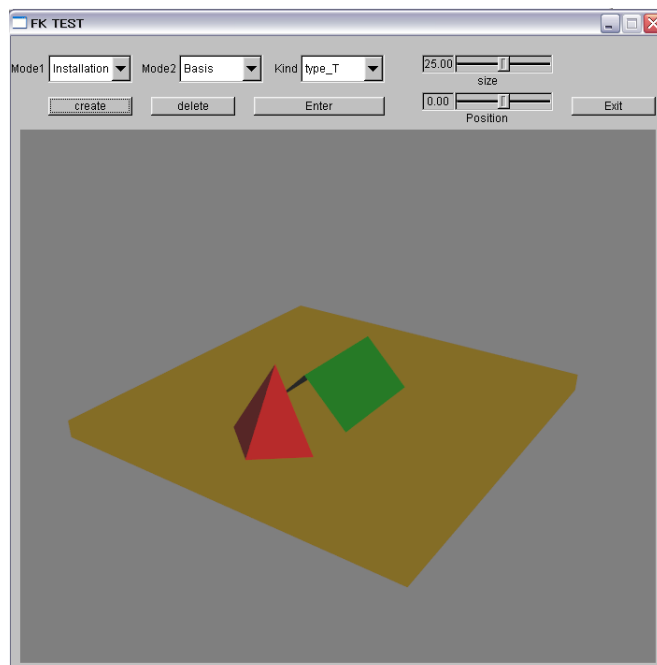


図 4.5: 複数仕掛けの例

4.1.2 プルタブ型仕掛け

プルタブ型仕掛けをページに設置する。図 4.6 はプルタブ型仕掛けを設置した場合の例である。

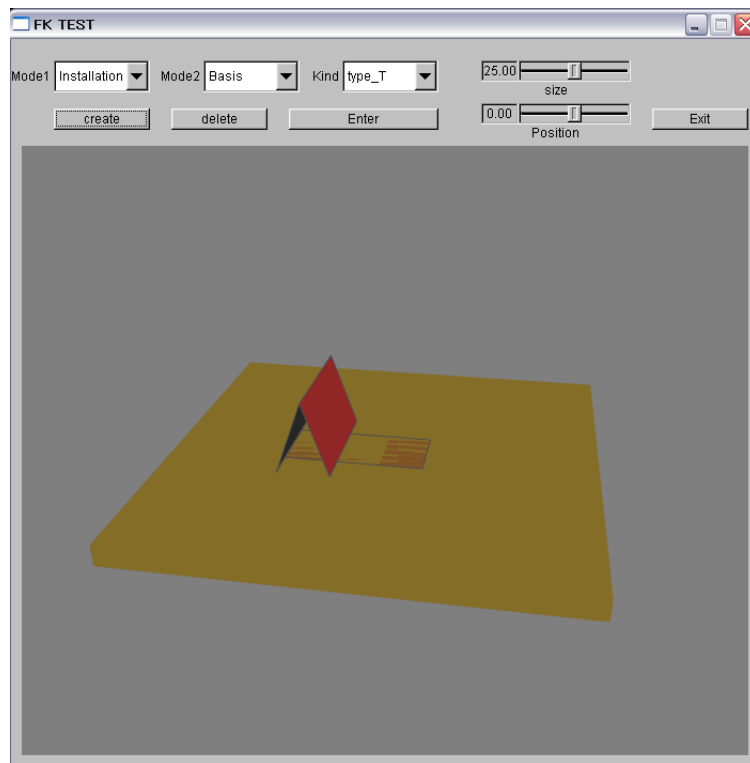


図 4.6: プルタブ型仕掛け設置の例

プルタブ仕掛けに限り、中心を対称とすることなく仕掛けを設置することができる。

4.1.3 仕掛け積み重ね

仕掛けを積み重ねるように設置する。図 4.7 は、仕掛けを積み重ねて設置した場合の例である。

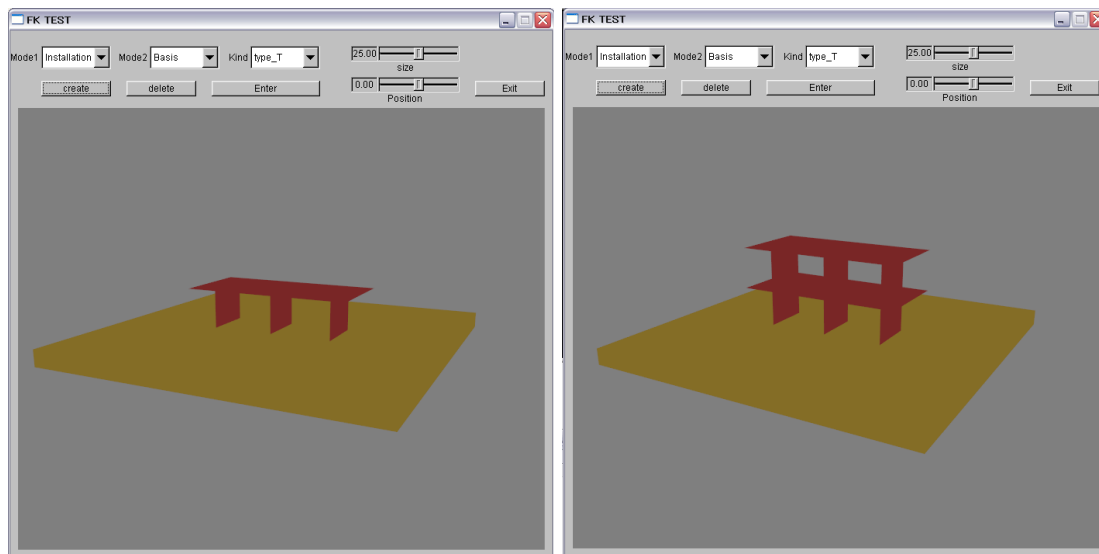


図 4.7: 仕掛け積み重ね設置の例

4.1.4 開閉アニメーション

本の開閉によるアニメーションを行う。ページ上の仕掛けが、ページを閉じたときにうまく折りたたまれるかを判定する。図 4.8 から図 4.12 はそれぞれの仕掛けによるページを開いたときのアニメーションの例である。

- テント型

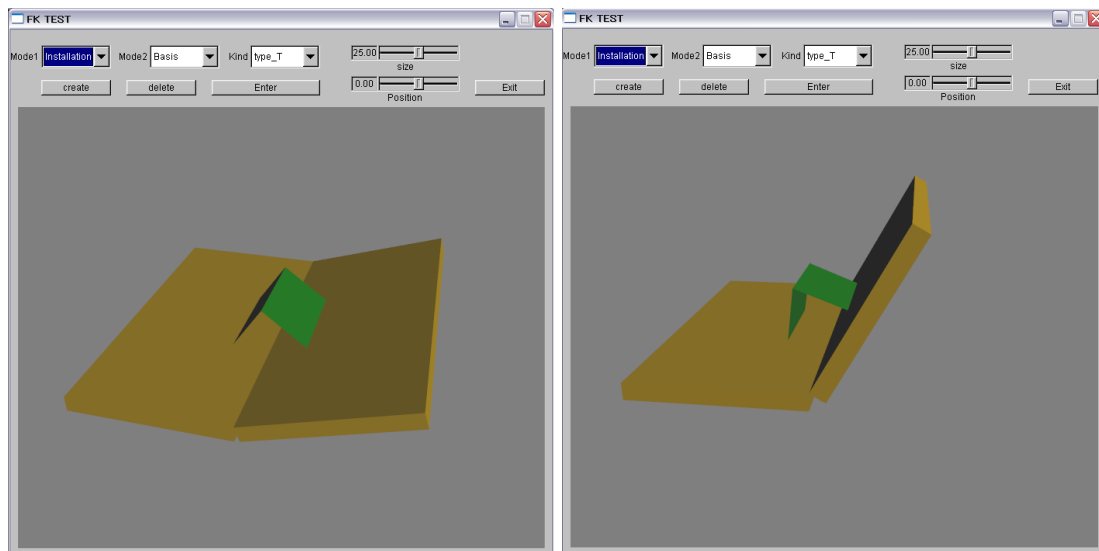


図 4.8: テント型の例

- V字型

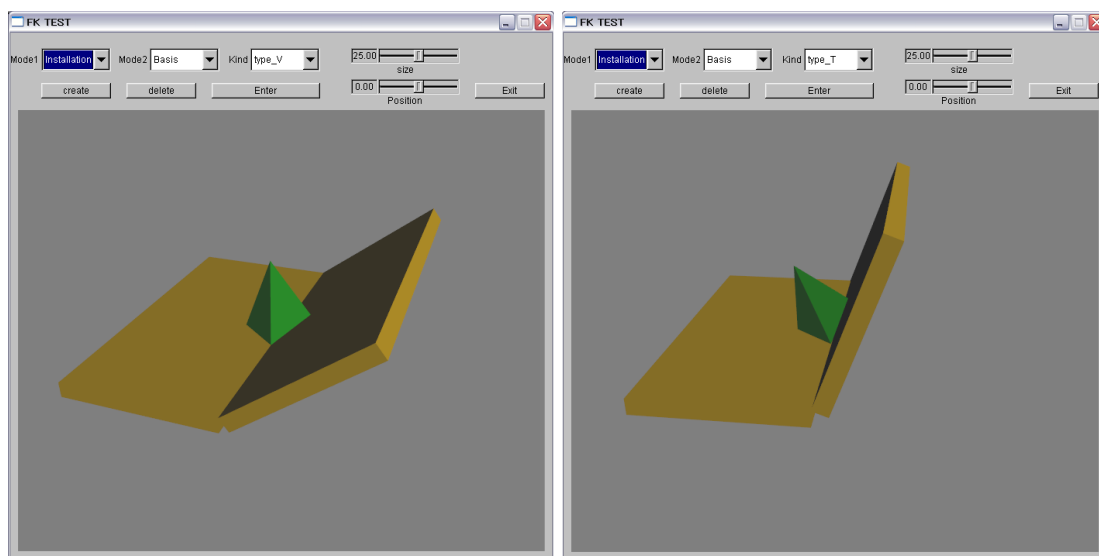


図 4.9: V字型の例

- テント型と V字型を複数設置

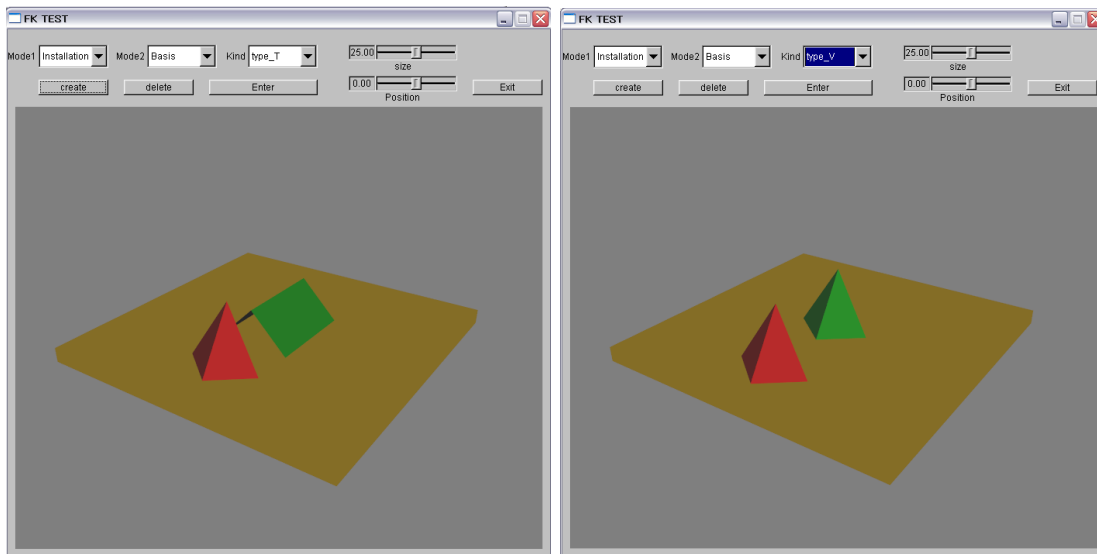


図 4.10: 複数の仕掛けを設置した場合の例

- プルタブ型

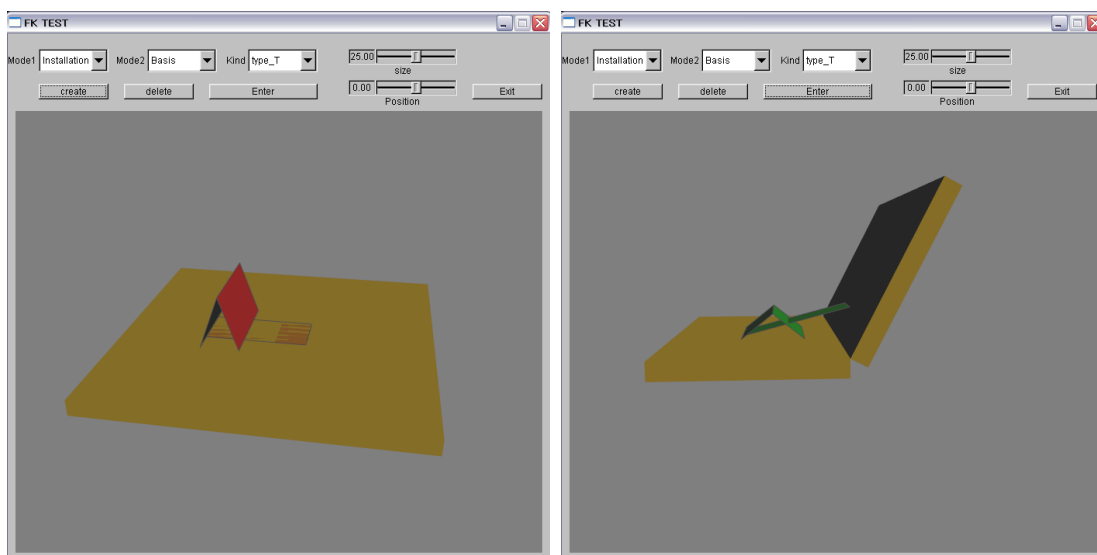


図 4.11: プルタブ型の例

- 積み重ね型

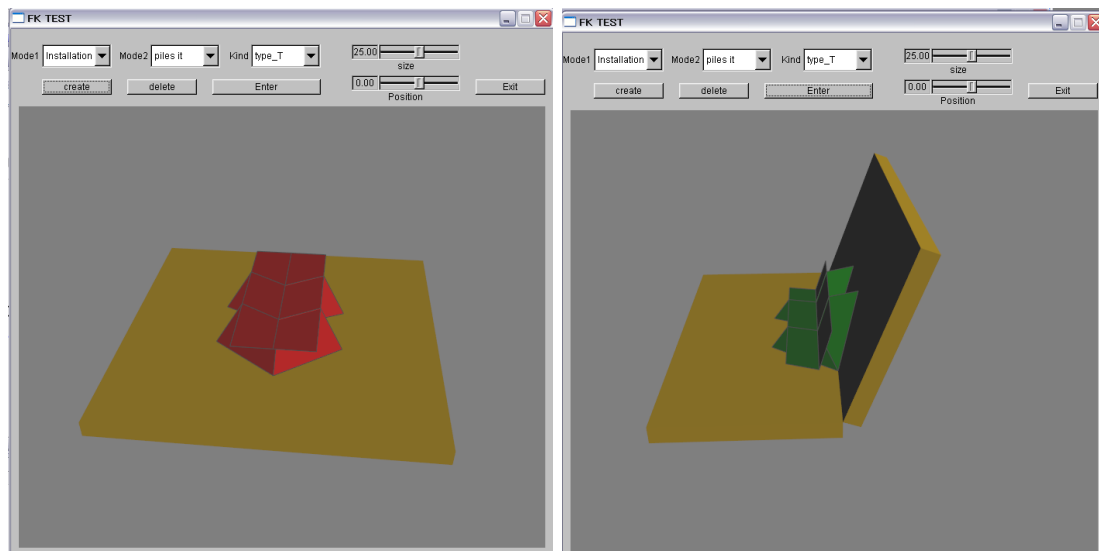


図 4.12: 積み重ね型の例

4.2 考察

本ツールによって、飛び出す絵本制作における基本的な仕掛けの配置と、仕掛けの積み重ねによる表現、プルタブ式仕掛けを設定することができた。またページが動いた際に、ページに設置されている仕掛けの動きを確認をすることができた。飛び出す絵本に多く使用されている仕掛け積み重ね機能とプルタブ式仕掛けを表現したことで、より絵本をデザインする上での設計を安易にした。しかし、本ツールではページ上に設置する仕掛けの個数を限定したため、複雑な構造をした仕掛けを表現することはできない。

第 5 章

まとめ

本研究では、飛び出す絵本の制作を支援するツールを開発した。折り紙建築における基本的な仕掛けの設置と、飛び出す絵本に多く用いられる仕掛けの積み重ね機能、プルタブ型機能の実装を可能にし、それに伴いページの開閉によるアニメーションを行った。今回は特にポップアップカードではなく飛び出す絵本を対象とし、絵本に多く見られる仕掛けの積み重ねとプルタブ型機能の設計を実現した。有限要素法を用いた力学的手法によって、本のページが動いた際に仕掛けが連動する動きを表現した。飛び出す絵本をデザインするにあたり、初心者がイメージすることが難しい仕掛けの動きの予想を支援することができた。

しかし飛び出す絵本には複雑な仕掛けが多々あり、表現しきれなかった仕掛けが多々ある。本の中心に対して非対称の仕掛けや、仕掛けの面が曲線を描くものがある。また仕掛けに切り込みを入れ、別の仕掛けの一部を差し込む組み込み式の仕掛けにも対応していない。ほかにも仕掛けの個数の限定を増やすため、本やページの厚みを考慮した設計を考える必要がある。これらの実現を今後の課題としたい。

謝辞

本研究におきまして、渡辺大地講師並びに本プロジェクトの皆様には大変お世話になりました。ここに感謝の意を表します。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] official wevsite of Robert Sabuda, <http://robertsabuda.com/>
- [2] 宮本周造, 新村晃一, ”月刊 MOE 第 31 卷第 1 号”, 白泉社, 2009.
- [3] Eric Carle, もりひさし, ”ポップアップ はらぺこあおむし”, 偕成社, 2009.
- [4] マリオン バタイユ, ”ABC3D ポップアップ見本帖”, 大日本絵画, 2008.
- [5] ロバート・サブダ, ルイス・キャロル, わく はじめ, ”不思議の国のアリス” 大日本絵画, 2004.
- [6] R. キップリング, マシュー ラインハート, わく はじめ, ”ジャングルブック” 大日本絵画, 2007.
- [7] David A. Carter, James Diaz, 岡松 きぬ子, ”実物で学ぶしかけ絵本の基礎知識ポップアップ”, 大日本絵画, 2000.
- [8] 高橋洋一, ”ポップアップの世界 飛び出すしかけ、8つの基本”, 新星出版社, 2009.
- [9] Joan Irvine, 加納 真士, ”しかけ絵本の作り方〈パート 1〉”, 大日本絵画, 1995.
- [10] 茶谷正洋の折り紙建築, <http://www.japandesign.ne.jp/IAA/chatani/index.html>.
- [11] 茶谷正洋, ”折り紙建築型紙集”, 彰国社, 1984.

- [12] 茶谷 正洋, 木原 隆明, ”折り紙建築 世界の名建築をつくる ”, 彰国社, 1999.
- [13] 茶谷 正洋, 中沢 圭子, ”折り紙建築 世界遺産をつくろう! ”, 彰国社, 2005.
- [14] 三谷純, 鈴木宏正, ”平面多角形の集合による「折り紙建築」モデルの表現と
計算機による設計支援”, 情報処理学会論文誌, 2004.
- [15] 藤原大三郎, 渡辺大地, ”切り起こし 180 度型折り紙建築の設計支援に関する
研究”, 情報処理学会第 67 回全国大会, 2005.
- [16] 加世田匠, 斎藤隆文, 宮田浩子, ”飛び出す絵本シミュレータ”, 情報処理学会研
究報告, 2005.
- [17] 岡村聡介, 五十嵐健夫, ”ポップアップカードデザインの製作支援インターフェー
ス”, グラフィクスと CAD 合同シンポジウム, 2009.
- [18] 堀辺 忠志, ”Visual Basic でわかるやさしい有限要素法の基礎”, 森北出版, 2008.
- [19] 邵 長城, ”基本からわかる有限要素法”, 森北出版, 2008.
- [20] 渡辺大地, Fine Kernel Tool Kit System. <http://fktoolkit.sourceforge.jp/>.