

2009年度 卒業論文

あやとり手順の3D表現のための
ツール開発に関する研究

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 M0106241
新保 満美

2009年度 卒業論文概要

論文題目

あやとり手順の3D表現のための
ツール開発に関する研究

メディア学部

学籍番号：M0106241

氏名

新保 満美

**指導
教員**

渡辺 大地 講師

キーワード

あやとり、3DCG、トポロジー、
紐図形、ナビゲーションツール

あやとりは大人から子供まで世界中の多くの人にとって親しみのある遊びである。あやとりでは目的の紐の形に至るまでの手順を理解することが重要だが、既存の手順説明では、取る紐が分かりにくい、取り方が分かりにくいといった問題がある。これらの問題は、既存の手順説明では紐に対して行う操作が分かりにくいと言い換えることができる。そこで本研究では、実際にあやとりを行う際に手順の理解を助けることを目的とし、あやとりの紐に対する操作を分かりやすく示すためのツールを開発した。操作の様子を分かりやすく示すため、操作の途中の状態から操作を行う様子をアニメーションで表現した。紐と手は3DCGで表現し、実際にあやとりを行う様子に近づけた他、いつでも任意の角度から紐と手の状態を確認できるようにした。これにより、先に述べた「取り方が分からない」などの手の動きが分からないという問題を解消した。さらに、操作の対象となる紐を他の部分とは色を変えて示すことで、「取る紐が分からない」などの操作の対象となる紐がわからないという問題を解消した。あやとりの紐の形は、紐が指に掛かっている点と、紐が紐の別の部分に引っ掛かっているもしくは交差している点、さらにそれらが紐中のある部分を始点として紐を辿るときにどのような順番にあるかをそれぞれ示すデータを元に表現した。このデータを操作に応じて変化することで、あやとりの操作による紐の変形を表現し、それを繰り返して目的の紐の形に至るまでを1つの手順とした。上記の機能を実装したツールを用いて検証を行った結果、推測とは異なり必ずしも手順の理解を早めることはできなかった。しかし、3DCGを用いたあやとりの手順説明において、既存の手順説明にはない利点もあり、あやとりの手順説明に3DCGを用いることで手順理解を助ける可能性があることはわかった。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景と目的	1
1.2	論文構成	4
第2章	あやとりの仮想表現と手順説明	5
2.1	あやとりの紐図形表現	5
2.1.1	指点	6
2.1.2	絡み点	7
2.2	紐図形の変形操作	7
2.2.1	「取る」	8
2.2.2	「外す」	10
2.2.3	「入れ替える」	11
2.3	紐安定化処理	12
2.3.1	ライデマイスター移動	13
2.3.2	絡み点変化	15
2.3.3	絡み点移動	16
2.4	3DCGによる表現	17
2.4.1	紐の表現	18
2.4.2	手の表現	19
2.5	手順説明	19
2.5.1	操作の結合	20
2.5.2	操作の説明	20
第3章	検証と考察	23
3.1	検証	23
3.1.1	あやとりナビゲーションツール概要	23
3.1.2	動作検証	24
3.1.3	既存手順説明との比較検証	28
3.2	考察	30
第4章	まとめ	32

謝辞	34
参考文献	35
付録 A 章あやとり表記法記述一覧	37

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景と目的

あやとりは、1本の輪にした紐を手に掛け、指でその紐を取り、様々な形を作る遊びである。あやとりは日本だけでなく世界中の人々にとっても親しみがあり、世界の様々なあやとりを紹介した本 [1] も存在する。それ以外にもあやとりの手順を紹介している書籍 [2][3] は数多くあり、内容も子供向けから大人向けまで様々である。また、近年ではインターネットの普及に伴い、既存のあやとり手順をインターネット上で紹介する人が増えている。中には自作したあやとりの手順を公開しているウェブサイト [4] もある。

あやとりでは、目的とする形を形成するまでの手順を理解することが非常に重要である。手順説明として既存にある方法は、絵や写真などの画像と文章による説明が一般的で、近年ではあやとりを行う様子を撮影した動画による説明も増えている。図 1.1 は絵と文による手順説明の例である。手順を見ながらあやとりを行う際に多い問題として、取る紐が分からない、取り方が分からないという 2 点を挙げるができる。絵や写真などの画像と文章による説明では取り方などの動きを説明することが難しく、動画による説明では取る対象となる紐を示すことが難しい。また、あやとりの手順を記述する方法として String Figure Notation(以下あやとり表記法)[5] がある。図 1.2 は「さかずき」というあやとりの技の完成状態であり、左はその手順をあやとり表記法を用いて記述したものである。あやとり

表記法は動作や指などを記号で表すことにより、短い記述で手順を厳密に示すことが可能である。しかし、厳密に示すことで読む側にとっては返って分かりにくい説明になることがある。そのためあやとり表記法は、手順を分かりやすく示す方法としては適していると言えない。

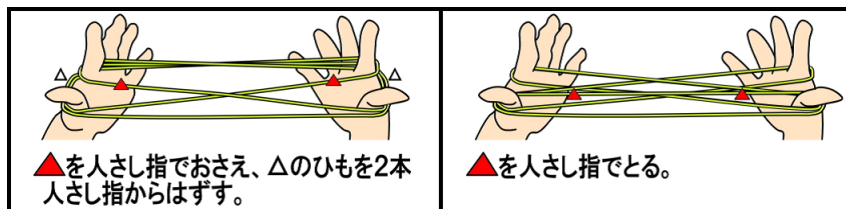


図 1.1: 絵と文による手順説明

- 「さかずき」手順

1. OA
2. T mo nFS pu fFS (ex)
3. na T
4. re L (ex)
5. T up

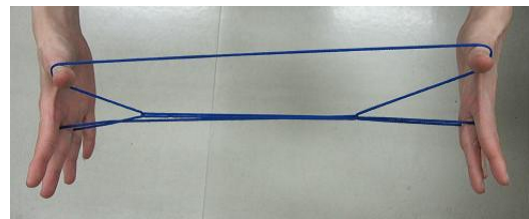


図 1.2: 「さかずき」完成図

あやとりの手順を理解しやすくするためには、行う動作を厳密にかつ分かりやすく示す必要がある。あやとりに関する既存研究 [6][7][8][9][10] の多くは、CGを用いた平面図によるシミュレーションを行っている。これらの研究は、あやとりの動作に対応する平面図を並べることで紐の状態を表現し、目的の紐の形を平面図で表現すると同時に、その形に至るまでの手順を示している。この方法による手順の示し方は、あやとり表記法による記述同様、手順を厳密に示すことが可能である。また、平面図を用いているため文章で表現するよりも直感的である。しかしこれらの研究では、目的の形に至るまでの過程として手順を示しているため、実際にあやとりを行う際の動作の説明として分かりやすいものではない。

あやとり以外で動作を分かりやすく示したツールの例として、折り紙のナビゲーションソフト [11] と手話の学習ツール [12] がある。これらは、1つの動作ごとに任

意の再生速度で繰り返し動きを確認することを可能にしたり、3Dモデルが行う動作をユーザーが任意の方向から見ることを可能にすることで動作を分かりやすく示している。このように、3DCGを用いると動作を分かりやすく示すことが可能である。

あやとりに関する既存研究で3DCGを用いた研究には、仲ら [13] の研究がある。この研究は、バーチャルリアリティに関する研究としてあやとりを仮想的に表現するため、計測した実際の毛糸の状態を3DCGで表現している。しかしこの研究では、実際の紐の状態を3DCGで表現することを目的としているため、あやとりの手順や動作については言及していない。

以上のことを踏まえ、本研究では3DCGを用いて、実際にあやとりを行う際の手順の理解を助けることを目的とし、あやとりの動作を分かりやすく示すツールを開発した。動作を分かりやすく示すため、動作1つ1つをアニメーションで表現した。その際、紐と手を3DCGで表現することで、実際にあやとりを行う様子に近づけた他、いつでも任意の角度から紐と手の状態を確認できるようにした。これにより、先に述べた「取り方が分からない」などの手の動きが分からないという問題を解消した。さらに、「取る」などの動作の対象となる紐を他の部分とは色を変えて示すことで、「取る紐が分からない」などの動作の対象となる紐がわからないという問題を解消した。

紐の変形は、任意の紐の形を表現できるデータ構造を作り、そのデータを動作ごとに変化することで表現した。データとしたのは、紐が掛かっている指、紐が紐の別の部分に引っ掛かっている点、それらが紐中のある部分を始点として紐を辿るときにどのような順番にあるかをそれぞれ示す情報である。手の変形については、動かす指、動作内容、対象となる紐の情報を元に動作途中の指の座標を求め、その位置に指を移動することで行った。

1.2 論文構成

本論文は全4章で構成する。第2章で本研究で制作したツールの詳細を述べ、第3章では実際にあやとりを表現出来ているかどうか、既存のあやとり手順の示し方よりもわかりやすいと言えるかどうかを検証し、考察を述べる。最後に第4章で本研究のまとめを行う。

第 2 章

あやとりの仮想表現と手順説明

本章では、本研究におけるあやとりの表現方法と手順説明の方法について述べる。初めにあやとりの紐の形を表現する方法について述べ、その後紐の形を変形する操作について述べる。続いて、操作によって変化した紐の形を表すデータを最適化させる紐安定化処理について述べる。その後、あやとりの 3DCG による表現方法を述べ、最後に手順説明の方法について述べる。

2.1 あやとりの紐図形表現

あやとりを仮想的に表現したとき、紐の掛かり方や指の位置などの情報を基にして紐が作る形のことを、紐図形と呼ぶ。紐図形中には、紐が指に掛かっている部分や、紐が紐の別の部分に引っ掛かっているまたは交差している部分が存在する。これらを点で表したとき、紐が指に掛かっている部分を指点、紐が紐の別の部分に引っ掛かっているまたは交差している部分を絡み点と呼ぶ。指点について、紐が同じ指に複数回掛かっているとき、それら 1 つ 1 つは別の指点として扱う。また、それらの指点は全て異なる高さにあるとすることで、同じ指に掛かっている紐の上下関係を表すことができる。一方絡み点について、1 つの絡み点は、交差の上側を表す点と下側を表す点の異なる高さの 2 点から成る。つまり、1 つの絡み点を上下に分け、それらを別の点として扱うことで交差の上下を表現する。本研究

においては、それら指点と、絡み点の上下を全て1回ずつ順に辿ることで紐図形を表現する。このときの辿った順番を連結データと呼ぶ。図 2.1 は、紐が交差する部分がないように紐を両手の親指と小指に掛けた状態から、左右の中指で反対の掌の紐を左掌から先に交互に取った状態の紐図形を平面図で表したものである。また表 2.1 はそのときの連結データである。あやとりにおいて、この、紐が交差する部分がないように紐を両手の親指と小指に掛けた状態から、左右の中指で反対の掌の紐を左掌から先に交互に取った状態は基本状態と呼び、本研究においては紐図形の初期状態とする。連結データ中の F_1 は左手の親指、 F_2 は右手の中指、 F_3 は左手の小指、 F_4 は右手の小指、 F_5 は左手の中指、 F_6 は右手の親指をそれぞれ指す指点であり、 T_1 は F_1 と F_2 を結ぶ紐と F_5 と F_6 を結ぶ紐が交差する点、 T_2 は F_5 と F_4 を結ぶ紐と F_3 と F_2 を結ぶ紐が交差する点をそれぞれ指す絡み点である。

2.1.1 節で指点について、2.1.2 節で絡み点について詳しく述べる。

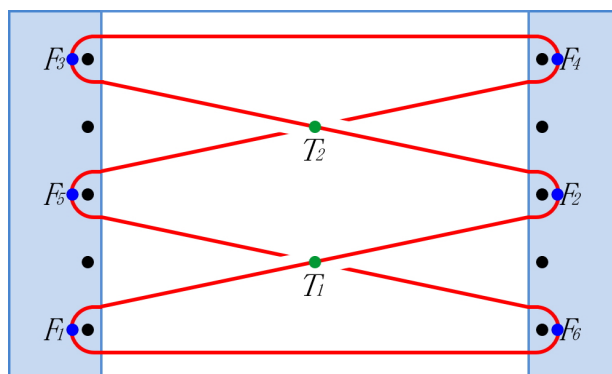


図 2.1: あやとり平面図

表 2.1: 初期状態連結データ

要素	高さ
F_1	1
T_1	2
F_2	1
T_2	2
F_3	1
F_4	1
T_2	1
F_5	1
T_1	1
F_6	1

2.1.1 指点

指点は、紐図形中で紐が指に掛かっている点を表す。全ての指点は、紐がどの指に掛かっているかという情報と、紐を辿って来たとき紐がその指の親指側か小指側のどちらの方向から引っ掛かっているかという2つの情報を保持している。紐がどの指に掛かっているかという情報は、紐が掛かっている指番号で表す。指番

号は両手の指全てに対してそれぞれ固有の番号を与えている。

2.1.2 絡み点

絡み点は、紐図形中で紐同士が引っ掛かっている点、もしくは紐図形が初期状態にあるときに紐図形を指先の方向から見て紐が交差している点を表す。全ての絡み点は、絡み数と位置を表す座標の2つの情報を保持している。絡み数は、ただ交差しているだけの状態を0とし、2本の紐が交差状態から絡むように半回転するごとに1ずつ増えていく。絡み点の中で絡み数が0の点を、特別に交差点と呼ぶ。図2.2は絡み数が0の絡み点(交差点)、図2.3は絡み数が1の絡み点をそれぞれ示している。

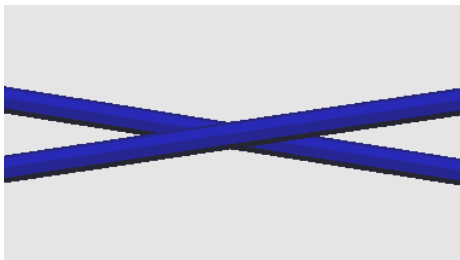


図 2.2: 絡み数0の絡み点(交差点)

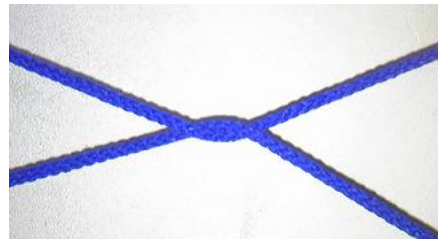


図 2.3: 絡み数1の絡み点

2.2 紐図形の変形操作

あやとりの手順は、紐図形を目的の形にするまでに行う、操作の順番を示したものとする。操作は、あやとりを仮想的に表現する際の紐図形を変形する処理のこととする。操作は実際にあやとりを行う際の手の動きに相当する。本研究で扱う操作は、左右の手で同時に行うことができる操作に限定する。さらに、このとき動かす指を操作指、操作の対象となる紐を目的紐と呼ぶ。操作は左右同時に行うもの限定するため、操作指は左右の同じ指2本を同時に指す。紐図形の変形は、操作内容、操作指、目的紐のデータを元に、指点、絡み点、連結データの3種類のデータを変更することで表現する。

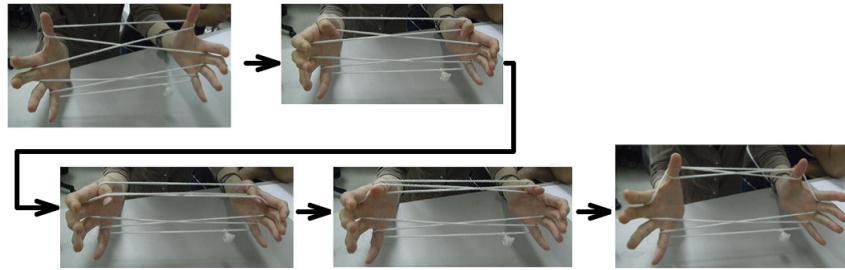


図 2.5: 「取る」操作を行う様子

「取る」は、新たに指点と交差点を生成し、それらを連結データに追加する。図 2.6 は、初期状態から親指で中指に掛かっている紐のうち親指側の紐を取った直後の紐図形を平面図で示したものであり、表 2.2 はそのときの連結データである。このとき、操作指は親指であり、目的紐は中指に掛かっている紐のうちの親指側の紐、つまり左手は F_5 と T_1 を結ぶ紐、右手は F_2 と T_1 を結ぶ紐となる。ここで新たに生成した指点は F_7 、 F_8 であり、新たに生成した交差点は T_3 から T_6 である。 F_7 は左手の親指、 F_8 は右手の親指の指番号を持つ指点であり、共に高さは 2 である。 T_3 は、 T_1 と T_5 を結ぶ紐が上側、 F_1 と T_1 を結ぶ紐が下側となる交差点であり、 T_4 は T_1 と T_6 を結ぶ紐が上側、 F_6 と T_1 を結ぶ紐が下側となる交差点、 T_5 は、 T_3 と F_7 を結ぶ紐が上側、 F_1 と T_6 を結ぶ紐が下側となる交差点であり、 T_6 は T_4 と F_8 を結ぶ紐が上側、 F_6 と T_5 を結ぶ紐が下側となる交差点である。ここでの具体的処理は、まず操作指を示す指点 F_7 、 F_8 を、連結データの F_5 と F_2 の間に追加する。さらに、目的紐と操作指の間にある紐数に対応した数の交差点数 4 つ分、その交差点 T_3 から T_6 を連結データの対応する部分に追加する。

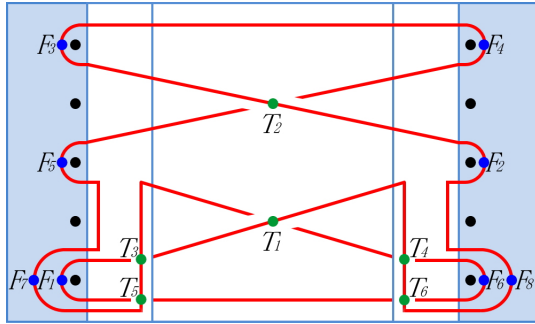


図 2.6: 「取る」平面図

表 2.2: 「取る」動作後連結データ

要素	高さ
F_1	1
T_3	1
T_1	2
T_4	2
T_6	2
F_8	2
F_2	1
T_2	2
F_3	1
F_4	1
T_2	1
F_5	1
F_7	2
T_5	2
T_3	2
T_1	1
T_4	1
F_6	1
T_6	1
T_5	1

2.2.2 「外す」

操作指に掛かっている紐のうち1番上の紐を外す動作に対応する操作を「外す」とする。「外す」は、操作指の最上の指点を削除し、外した紐と操作指に残っている紐との交差点を新たに生成し、連結データを追加する。図 2.7 は基本状態から親指の紐を外した直後の紐図形を平面図で示したものであり、表 2.3 はそのときの連結データである。ここで削除した指点は、 F_1 、 F_6 である。 F_1 は左手の親指、 F_6 の右手の親指の指番号をもつ指点である。

「外す」の具体的処理は、操作指の指番号を持つ指点の中で、連結データ上で最も高さが高い指点を削除する。操作指に複数本の紐が掛かっていた場合は、連結データ上で、削除した指点以外で操作指の指番号を持つ指点の前後と、削除し

た指点の前後に、新たに生成した交差点を追加する。

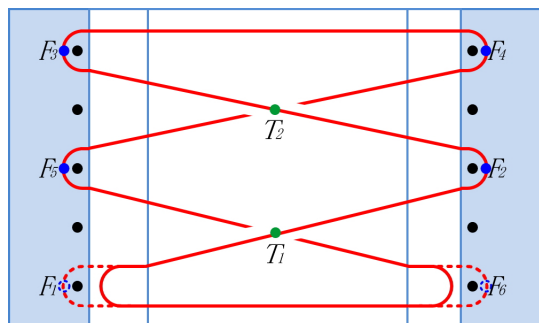


図 2.7: 「外す」平面図

表 2.3: 「外す」動作後連結データ

要素	高さ
T_1	2
F_2	1
T_2	2
F_3	1
F_4	1
T_2	1
F_5	1
T_1	1

2.2.3 「入れ替える」

操作指に複数本の紐が掛かっているとき、最下に掛かっている紐を最上に持ってくる動作に対応する操作を「入れ替える」とする。「入れ替える」は、操作指の指番号を持つ指点の高さを変え、操作指に掛かっていた紐数に応じた数の交差点を新たに生成し、連結データに追加することで表現する。図 2.8 は親指に掛かっている紐を入れ替える前の紐図形、図 2.9 は親指に掛かっている紐を入れ替えた直後の紐図形をそれぞれ平面図で示したものであり、表 2.4、表 2.5 はそれぞれの紐図形の連結データである。このとき、高さを変更した指点が F_1 と F_3 、 F_2 と F_4 であり、新たに追加した交差点が T_2 から T_5 である。 F_1 と F_3 は左手の親指の指番号を持つ指点、 F_2 と F_4 は右手の親指を指番号に持つ指点である。また、 T_1 は「入れ替える」操作前において F_1 と F_4 を結ぶ紐が上側、 F_2 と F_3 を結ぶ紐が下側となる交差点であり、 T_2 は、「入れ替える」操作後において F_3 と T_4 を結ぶ紐が上側、 F_1 と T_4 を結ぶ紐が下側となる交差点であり、同様に T_3 は T_1 と F_3 を結ぶ紐が上側、 F_1 と T_1 を結ぶ紐が下側となる交差点、 T_4 は T_2 と F_4 を結ぶ紐が上側、 F_2 と T_2 を結ぶ紐が下側となる交差点であり、 T_5 は F_4 と T_1 を結ぶ紐が上側、 F_2 と T_1 を結ぶ紐が下側となる交差点である。ここでの具体的処理は、まず操作指の指番号を持つ指点において、最下の指点 F_1 と F_2 を最上になるように高さを変更し、それ以

外の指点 F_3 、 F_4 の高さを 1 ずつ下げる。さらに、操作指に掛っている紐本数に対応する数の交差点 4 つを新たに生成し、その交差点 T_2 から T_5 を連結データに追加する。

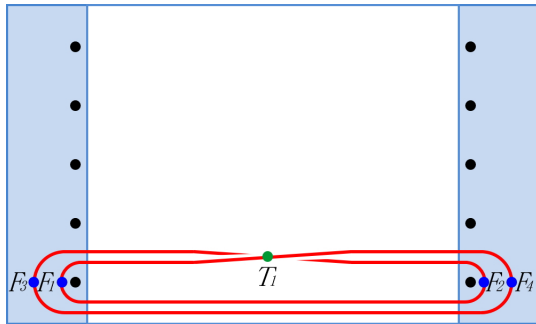


図 2.8: 「入れ替える」前平面図

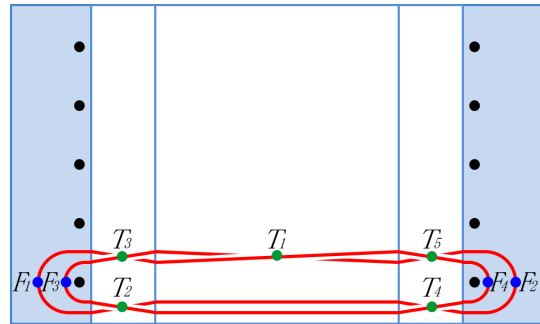


図 2.9: 「入れ替える」後平面図

表 2.4: 「入れ替える」前連結データ

要素	高さ
F_1	1
T_1	2
F_4	2
F_3	2
T_1	1
F_2	1

表 2.5: 「入れ替える」後連結データ

要素	高さ
F_1	2
T_3	1
T_1	2
T_5	2
F_4	1
T_4	2
T_2	2
F_3	1
T_3	2
T_1	1
T_5	1
F_2	2
T_4	1
T_2	1

2.3 紐安定化処理

あやとりを行う際の、操作と操作の間の両手を外側に広げ紐にたるみがなくなった状態を紐が安定している状態とし、紐図形において紐を安定させるための処理を安定化処理とする。本研究では、安定状態にある紐図形に対して任意の操作を

行い、その紐図形に対して安定化処理を行うことで再び紐図形を安定状態にする。それを1つの操作の過程とし、それを繰り返すことで目的の紐図形を作る。安定化処理では、紐図形の位相的性質は変化しないことを前提とする。

本節ではこの、紐安定化処理の内容について述べる。紐安定化処理は簡単化処理と最小化処理の2種類の処理からなる。簡単化処理は、連結データを変更し、消失することで紐図形が安定状態となるような交差点を削除する処理である。一方最小化処理は、指点や絡み点の座標を紐の長さの総和が最小になるように定める処理である。簡単化処理では、ライデマイスター移動と絡み点変化を用いて、紐図形の位相的性質を変化せずに連結データを変更する。最小化処理は、本研究では指の位置を固定とするため、絡み点座標のみを移動する。

簡単化処理では、連続する絡み点について処理を行う。連続する絡み点とは、連結データ内において一方の絡み点を構成する上下の点が、他方の絡み点を構成する上下の点とそれぞれ連続しているものとする。このとき、連続する上下の組み合わせは問わない。また、連結データ上で連続している点同士は連結しているとする。

2.3.1 ライデマイスター移動

ライデマイスター移動は、紐がたるんでいる状態とピンと張っている状態が同じ位相状態であるとした上で、紐の位相的性質を変えずに行う紐の変形である [14][15]。図 2.10 はライデマイスター移動 *I* を、図 2.11 はライデマイスター移動 *II* を、図 2.12 はライデマイスター移動 *III* をそれぞれ示している。ライデマイスター移動を用いることで、紐がたるんでいる状態とピンと張っている状態が同じ位相状態であるとして、紐図形の位相的性質を変えずに紐図形の連結関係の変更や交差点の削除を行うことができる [16]。

簡単化処理では、3種類のライデマイスター移動を、交差点数が減少、または紐の長さの総和が小さくなるように用いる。図 2.10 に示すライデマイスター移動 *I* と図 2.11 に示すライデマイスター移動 *II* では、紐がたるんだ状態にあるために存

在する交差点を、紐を引っ張ることで削除するように用いる。図 2.12 に示すライデマイスター移動 III では、交差点数は変化しないが、紐の長さの総和が小さくなるように用いる。これらは図 2.10 から図 2.12 の左側から右側への変形にあたる。

本研究では、3種類のライデマイスター移動を次のような処理とする。図 2.10 のライデマイスター移動 I は、同じ交差点の上下が連結しているとき、この交差点を削除する。図 2.11 のライデマイスター移動 II は、異なる2つの交差点があるとき、それぞれの交差点の上下が同じ高さ同士で連結しているとき、この2つの交差点を削除する。図 2.12 のライデマイスター移動 III においては、まず、異なる3つの交差点が十分に近い位置あるとする。このとき、ある交差点 A の上下がそれぞれ、別の交差点 B の下側とさらに別の交差点 C の下側とそれぞれ連結しており、かつ、交差点 B と交差点 C の上側が連結しているとする。この条件を満たすとき、まず連結データ上で交差点 B と交差点 C の上側の順番を入れ替える。さらに、同じく連結データ上で交差点 B と交差点 C の下側を、それぞれが連結している交差点 A と入れ替える。

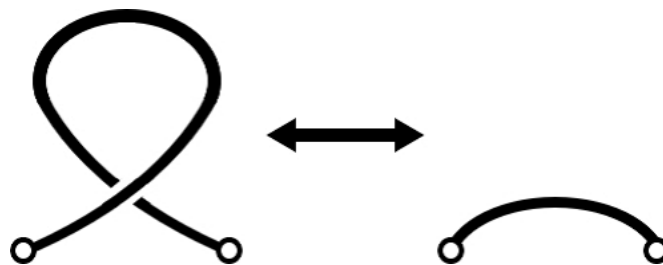


図 2.10: ライデマイスター移動 I

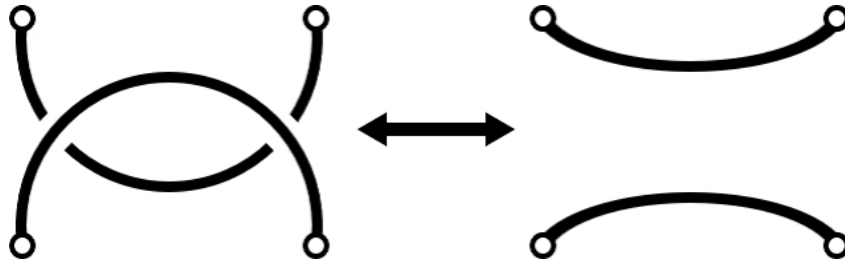


図 2.11: ライデマイスター移動 II

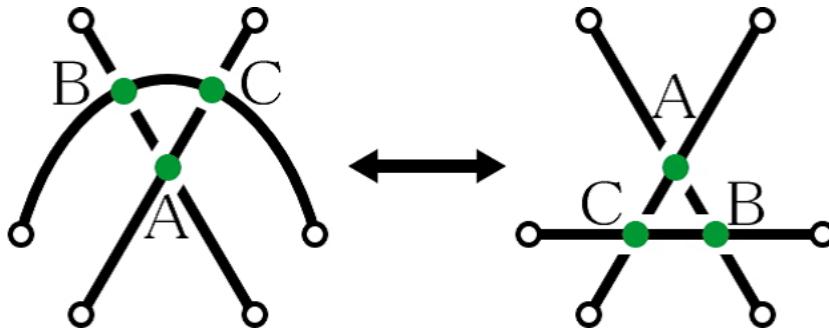


図 2.12: ライデマイスター移動 III

2.3.2 絡み点変化

絡み数が1以上の絡み点は、その絡み点の絡み数+1の数だけの交差点が連続した状態と同じ紐の状態である。そのため、全ての絡み点は交差点に分解でき、連続する絡み点分の交差を統合したり相殺したりすることで、絡み点の数を必要最低限にすることができる。

まず、連結データ上で2つの絡み点が連続しているとき、この2つの絡み点は並んでいるとする。紐図形において2つの絡み点が並んでいるとき、それぞれの絡み点を交差点に分解する。このとき、並び合う交差点を構成するの上下の点が反転して連結している場合、2つの交差を足し合わせ、1つの絡み点にする。逆に、並び合う交差点の上同士、下同士が連結している場合、2つの交差を削除する。図

2.13 は並び合う交差点の上下が反転して連結している 2 つの絡み点を示し、図 2.14 は並び合う交差点の上同士、下同士が連結している 2 つの絡み点を示している。

交差を足し合わせる処理は、一方の絡み数に他方の絡み数+1 の値を足し、一方の絡み点を削除する。交差を削除する処理は、一方の絡み数から他方の絡み数+1 の値を引き、一方の絡み点を削除する。このとき、変化後の絡み数が負の値になった場合、連結データ上でこの絡み点の上下を入れ替え、絡み数に 1 を加える。

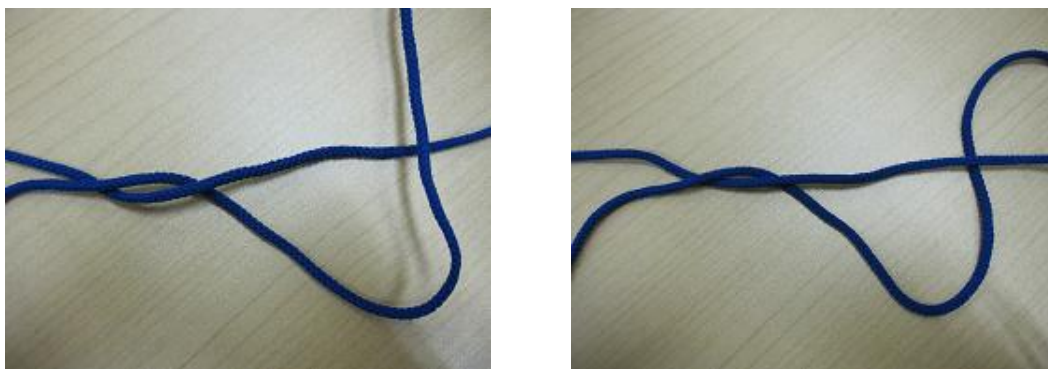


図 2.13: 上下の点が反転して連結している 2 交差点
 図 2.14: 上同士、下同士が連結している 2 交差点

2.3.3 絡み点移動

絡み点移動では、絡み点を、連結する 4 点との距離の総和が最小になる位置に移動する。本研究では、伊藤 [16] の研究における交差点移動の方法を用いる。

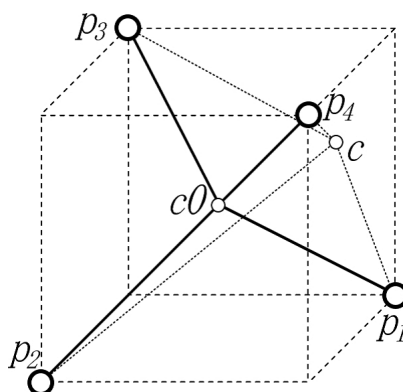


図 2.15: 4 点からの距離の総和が最小となる点

図 2.15 は、4 点 $p_i (i = 1, \dots, 4)$ との距離の総和が最小となる点 c_0 を示している。任意の点 c から 4 点 $p_i (i = 1, \dots, 4)$ への単位ベクトルの和を $\mathbf{V}(c)$ とすると、 $\mathbf{V}(c)$ は (2.1) 式で求めることが可能である [17]。

$$\mathbf{V}(c) = \sum_{i=1}^4 \frac{\mathbf{p}_i - \mathbf{c}}{|\mathbf{p}_i - \mathbf{c}|} \quad (2.1)$$

ここで、 \mathbf{c} および $\mathbf{p}_i (i = 1, \dots, 4)$ はそれぞれ点 c および点 $p_i (i = 1, \dots, 4)$ の座標を示す。

最小化処理では、絡み点の座標を \mathbf{c} 、絡み点が連結する 4 点の座標を $\mathbf{p}_i (i = 1, \dots, 4)$ とすることで、絡み点が連結している 4 点からの距離の総和が最小となる点の座標を求め、絡み点をその点に近づけていく。このとき、(2.1) 式の $\mathbf{V}(c)$ を絡み点 c の移動ベクトルとし、絡み点 c を移動ベクトルの方向に距離 $a |\mathbf{V}(c)|$ だけ移動する。このとき、移動ベクトルが大きいと紐の長さの総和が収束しない。これを防ぐために、移動ベクトルの係数 a は十分に小さい値とする。このような絡み点移動処理を一定回数繰り返すことで、逐次的に絡み点の座標を移動していく。全ての絡み点における移動ベクトルの総和が単調に減少しているとき、紐図形は安定状態に向かい、絡み点移動が順調に行われているとする。このような場合には移動ベクトルの係数 a の値を大きくし、移動ベクトルを大きくする。そうでないならば、移動ベクトルを小さくする。このように移動係数を動的に変化することで、最小化処理の効率を良くし、また絡み点移動の相互干渉を小さくする。本研究では、絡み点移動の繰り返し回数を 800 回、 a の初期値を 10.0、 a の最小値を 0.001 とした。また、移動ベクトルを大きくするときの a の増加量を 0.05、移動ベクトルを小さくするときの a の減少量を 0.05 とした。

2.4 3DCG による表現

本研究では、あやとりを手と紐を表示することで表現する。本節では、本研究における紐と手の 3DCG を用いた表現方法について述べる。初めに紐の表現方法、

続いて手の表現方法について述べる。

2.4.1 紐の表現

本研究では、紐図形の紐を指と接触している紐、絡み点、連結データを結んだ紐の3つに分けて描画する。3つの部分はそれぞれ、指点データ、絡み点データ、連結データを元に表現する。紐は、任意の2点を両端とする円柱を連続的に配置することで表現する。図2.16は指と接触している紐、図2.17は絡み点を示している。連結データを結んだ紐において、上下の紐が接触しない交差点は円柱の端とせず、連結データ上でその前後の指点か絡み点を端とする。図2.18は上下の紐が接触する交差点、図2.19は上下の紐が接触しない交差点をそれぞれ示している。ここで、 $p_i (i = 1, \dots, 4)$ は交差点に連結する点であり、 T は、 P_1 と P_2 を結ぶ紐が上側、 P_3 と P_4 を結ぶ紐が下側を通る交差点である。接触するかどうかの判断は、まず紐図形が基本状態にあるときの指先の方向から見て上下の紐が交差しているかどうかを判断し、交差していた場合は交差している点を仮の交差点とする。仮の交差点上で上側の紐と下側の紐が、紐の太さよりも近い距離にある場合は上下の紐が接触しているとする。

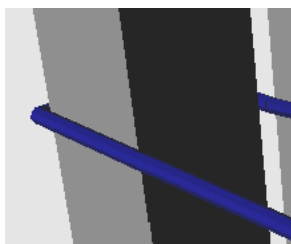


図 2.16: 指と接触している紐

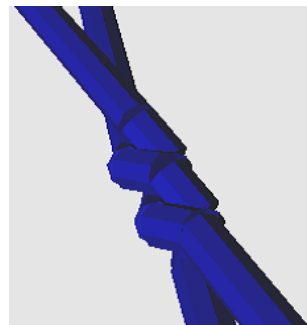


図 2.17: 絡み点

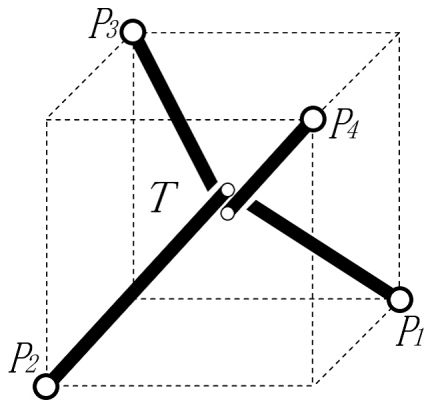


図 2.18: 上下の紐が接触する交差点

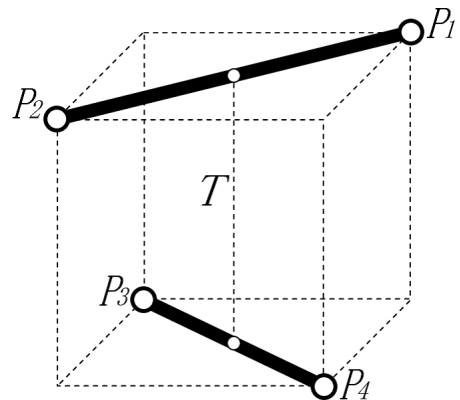


図 2.19: 上下の紐が接触しない交差点

2.4.2 手の表現

手は、モデリングソフトを用いて制作した手の 3D モデルを用いて表現する。片方の手につき、掌、親指の付け根、小指の付け根、各指を関節ごとに分けた計 17 つのモデルで構成している。手は操作途中以外では常に基本状態に固定して表示する。

2.5 手順説明

本研究ではこれまでに述べた方法であやとりを仮想的に表現し、目的の紐の形に至るまでの手順を説明する。ここでの手順とは、初期状態から目的とする紐図形を形成するまでに行った操作の内容と順番のことを言う。手順説明では、操作の内容、操作指、目的紐の情報を元に操作を行う様子を示す。

既存のあやとりの手順説明では、取る紐が分かりにくい、取り方が分かりにくいと言った問題があった。本研究ではそれらの問題を解消するため、操作の対象となる紐と、操作を行う様子を明確に示す。さらに、それらの指示を明確化するため、視点を任意に移動可能にした。視点の移動は 3DCG 空間内のカメラを動かすことで表現する。移動方法は、焦点とカメラ両方の平行移動、焦点を中心としたカメラの回転、焦点とカメラの延長線でのカメラの平行移動の 3 種類である。

本節ではまず、手順説明の際に行う操作の結合について述べた後、具体的な手順説明の方法について述べる。

2.5.1 操作の結合

本研究において「取る」や「外す」の対象となる紐は、指の1番上に掛かっている紐である。そのため、指の1番上以外に掛かっている紐を操作の対象としたいときには、対象にしたい紐を指の1番上にする必要がある。「入れ替える」はそのために行う操作である。しかし、本来のあやとりでは「入れ替える」に相当する動作はほとんど行わない。そこで手順説明の際には、「入れ替える」操作を行う様子は表現せず、代わりに次の操作の目的紐を変更する処理を行う。すなわち、説明する手順の中に「入れ替える」がある場合、「入れ替える」の次の操作の目的紐を、「入れ替える」操作前に1番下にあった紐に変更する。そして、「入れ替える」操作を行う様子は表現せず、次の操作を行う様子は「入れ替える」操作前の紐図形を用いて行う。

2.5.2 操作の説明

手順説明は行う操作の説明を繰り返すことで行う。操作の説明は、まず操作の対象となる紐を示し、その後操作を行う様子を示す。操作の対象となる紐は、紐の他の部分と色を変えることで指示する。操作を行う様子は、それぞれの操作を行う様子をアニメーションで示す。アニメーションは、操作途中の一定の状態から操作ごとの手や紐の動きを示す。操作途中の状態は、「取る」は操作指を目的紐に引っかけた直後の状態、「外す」は操作指を折り曲げて紐を外す直前の状態をそれぞれ示す。それぞれの状態から、「取る」は指を起こす様子、「外す」では紐を外す様子をそれぞれアニメーションで示す。操作途中の状態は、行う操作の内容、操作指、目的紐の情報から指と紐の状態を求めて表示する。

図 2.20 は操作の対象となる紐を示している様子、図 2.21 は「取る」操作途中、図 2.22 は「外す」操作途中の様子を示している。

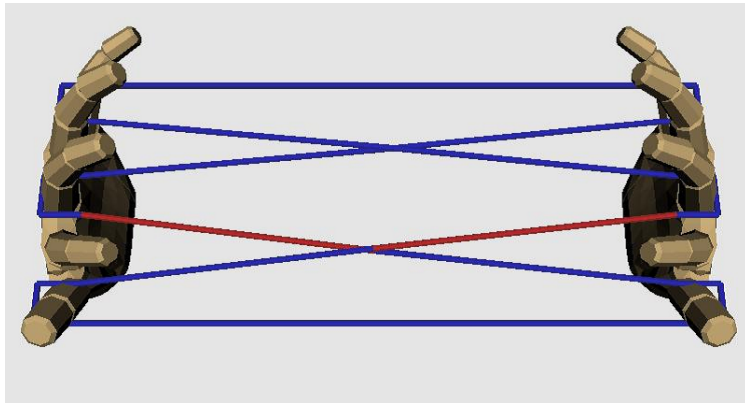


図 2.20: 目的紐の指示

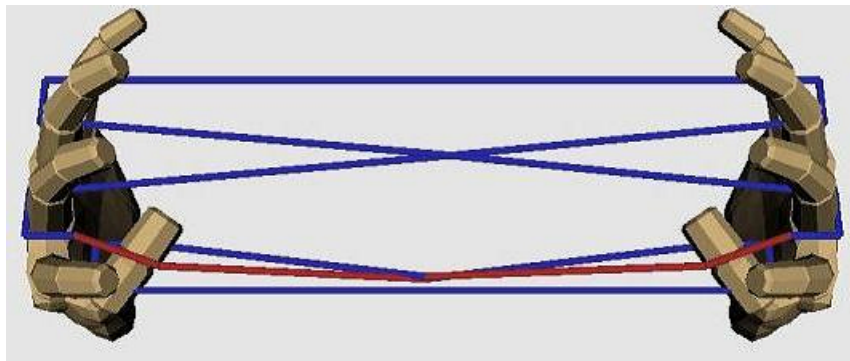


図 2.21: 「取る」操作途中

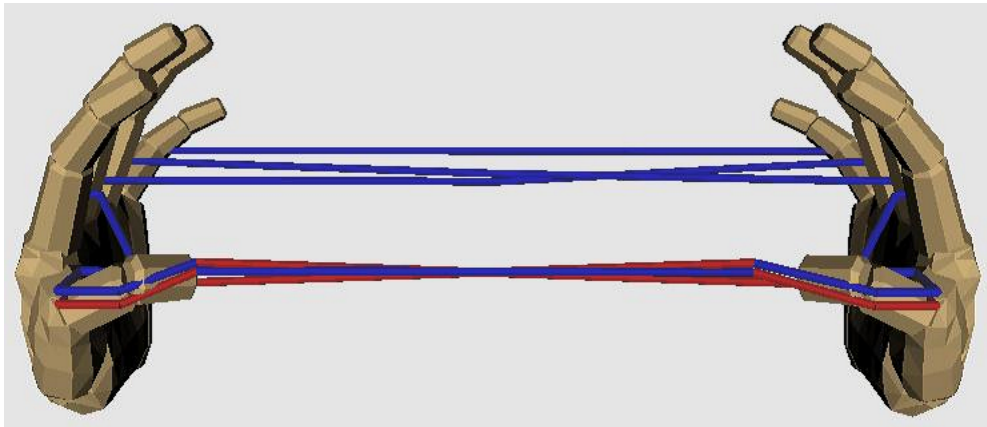


図 2.22: 「外す」操作途中

第 3 章

検証と考察

本研究では 3DCG ツールキットである Fine Kernel Tool Kit[18] を用いて実装を行い、2種類の検証を行った。本章ではまず、制作したあやとりナビゲーションツール(以下本ツール)の概要と2種類の検証結果を述べ、最後に考察を述べる。

3.1 検証

本研究では、実装した本ツールを用いて2種類の検証を行った。行った検証は動作検証と比較検証の2種類である。動作検証では、入力した操作に対して適切な変形を行い、目的とする紐図形を完成することができるかどうかを検証した。比較検証では、既存のあやとり手順説明と本ツールによる手順説明の2種類の手順説明を見ながら実際にあやとりを行い、どちらが短時間で目的の紐の形に至るかを比較し、本ツールの優位性を検証した。本節では初めに本ツールの概要について述べた後、それぞれの検証の結果について述べる。

3.1.1 あやとりナビゲーションツール概要

本ツールは大きく分けて、手順入力と手順説明の2種類の機能を持つ。手順入力では、操作指、操作の内容、目的紐の3種類を選択し、Action ボタンを押すことで選択された操作を実行する。操作指は親指、人差指、中指、薬指、小指の5種

類から選択し、操作内容は「取る」、「外す」、「入れ替える」の3種類から選択する。目的紐は親指側を手前、小指側を奥とし、親指に掛かっている手前の紐、親指に掛かっている奥の紐、以下同様に小指に掛かっている奥の紐までの10種類から選択する。これを1つの操作の入力とし、紐図形が目的の形になるまで操作の入力を繰り返す。最終的に、行った操作とその操作による変形後の紐図形データを手順データとして出力する。

手順説明では、手順データを元に操作の説明を行う。操作の説明は、目的紐の指示、操作途中の状態の指示、操作を行う様子のアニメーションの3段階からなる。これらの表示はキーボードを用いて切り替える。

3.1.2 動作検証

動作検証では、任意の操作を繰り返し行うことで、紐図形が目的とする紐の形に至るかどうかを検証する。検証では、「バツタ」というあやとりの技を目的の紐の形とする。初期状態から「バツタ」完成状態に至るまでに行う操作は、表3.1の通りとする。

表3.1: 「バツタ」手順

手順番号	操作指	操作	目的紐
1	親指	取る	中指に掛かっている手前の紐
2	親指	入れ替える	—
3	親指	外す	—
4	小指	取る	中指に掛かっている奥の紐
5	小指	入れ替える	—
6	小指	外す	—
7	中指	外す	—

表3.1の手順通りに本ツールに対して操作を入力し、それぞれの操作入力後の紐図形の状態を実際の紐の形と比べる。図3.1、図3.12は、初期状態から表3.1の手順通りの操作を、ツールと実際の紐で行った様子をそれぞれ示している。さらに、

「バツタ」完成時の紐図形を平面図で示したものを図3.14に、手順入力が終了した際の連結データ、絡み点データ、指点データをそれぞれ表3.2～表3.3に示す。ここで示す絡み点のデータには、位置座標を含まない。

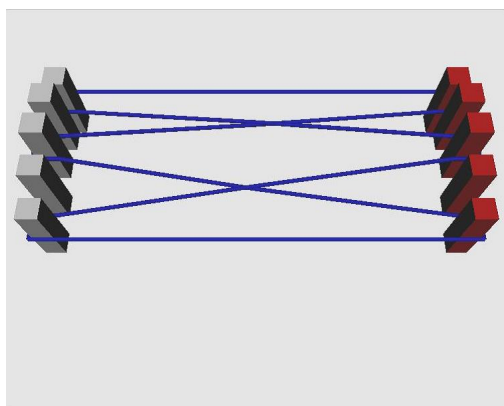


図 3.1: 本ツール初期状態

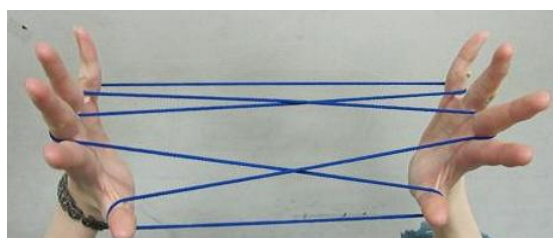


図 3.2: 実際の初期状態

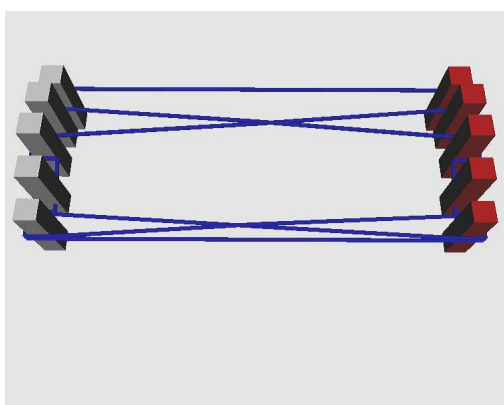


図 3.3: 本ツール手順1後

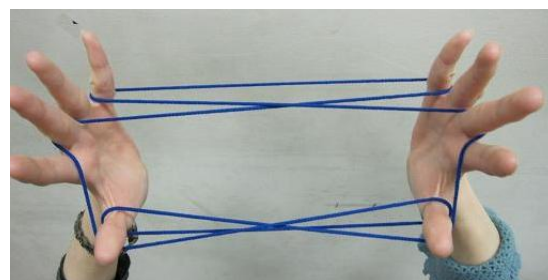


図 3.4: 実際の手順1後

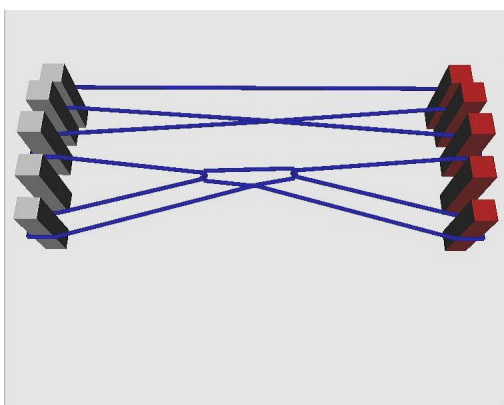


図 3.5: 本ツール手順3後

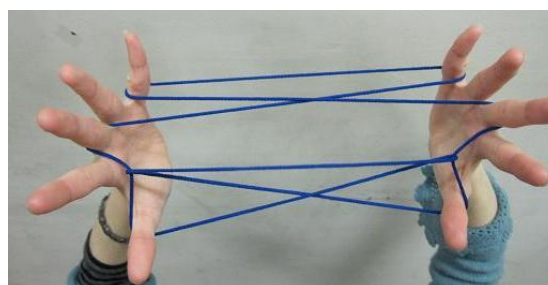


図 3.6: 実際の手順3後

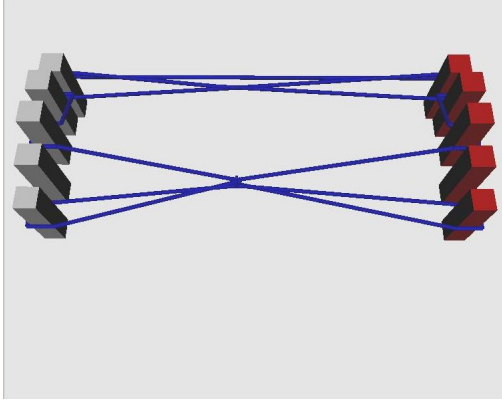


図 3.7: 本ツール手順 4 後

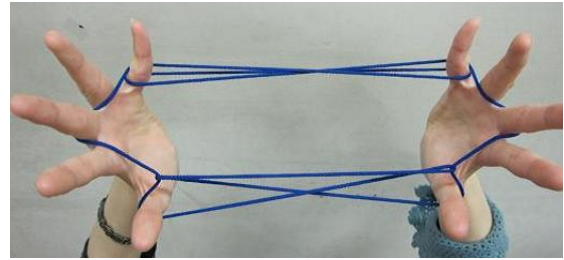


図 3.8: 実際の手順 4 後

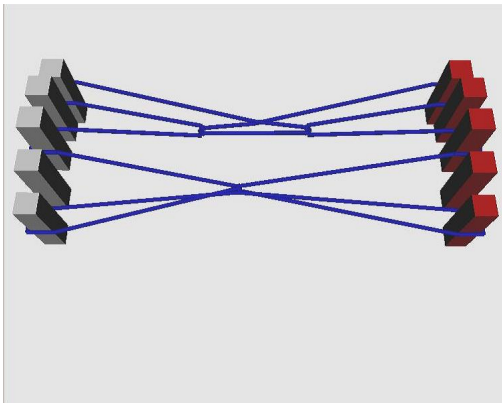


図 3.9: 本ツール手順 6 後

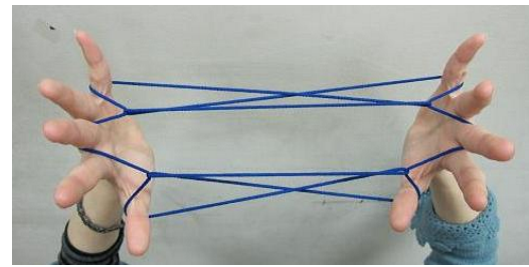


図 3.10: 実際の手順 6 後

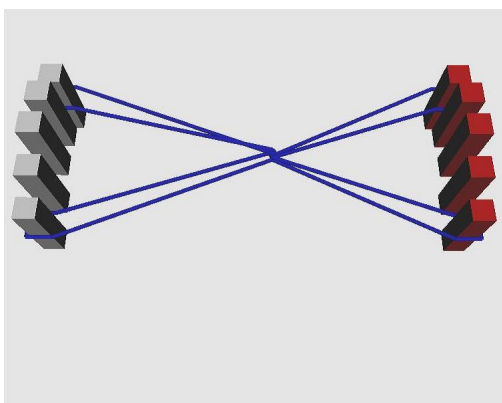


図 3.11: 本ツール完成形

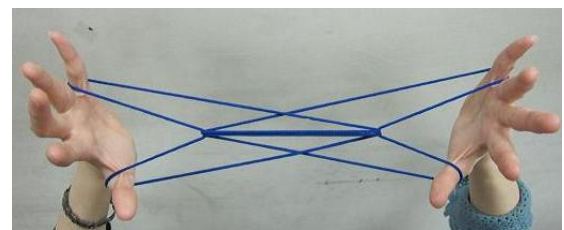


図 3.12: 実際の完成形

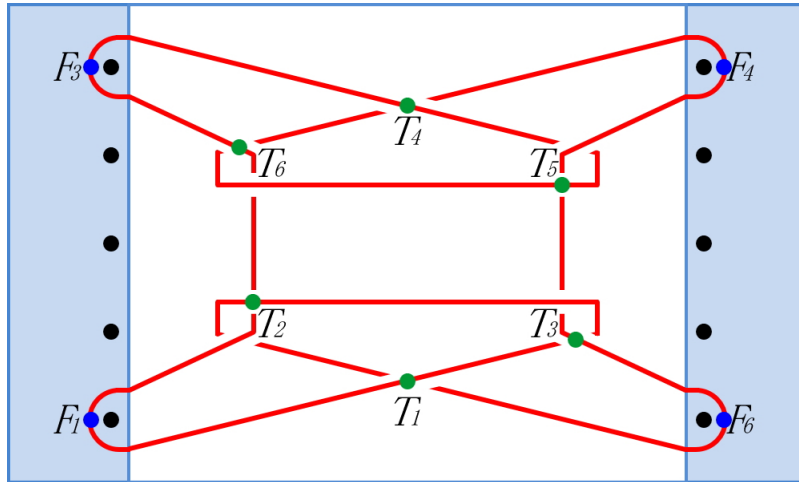


図 3.13: 「バッタ」平面図

表 3.2: 「バッタ」完成時の連結データ

要素	高さ
F2	1
T3	2
T5	1
F4	1
T4	1
T6	1
T5	2
T4	2
F3	1
T6	2
T2	1
F1	1
T1	2
T3	1
T2	2
T1	1

表 3.3: 絡み点データ

ID	絡み数
1	0
2	1
3	1
4	0
5	1
6	1

表 3.4: 指点データ

ID	指	紐が掛かる方向
1	左手親指	小指側から
2	右手親指	親指側から
3	左手小指	小指側から
4	右手小指	親指側から

まず、本ツールで生成した紐図形が、「バツタ」完成時の実際の紐の形と連結データが等しいどうかを検証する。図 3.14 に示した平面図と表 3.2、表 3.3 に示した紐図形データを比較する。図 3.14 に示した平面図において、紐中のある点を始点として紐全体を辿ったときの連結データは、表 3.2 に示した連結データと一致する。また、そのときの指点と絡み点のデータも一致する。よって、本ツールで生成した紐図形は、「バツタ」完成時の実際の紐の形と連結データが等しいと言える。

次に、操作入力毎の紐図形を実際の紐の形と比較する。図 3.3～図 3.12 に示す本ツールの紐図形と実際の紐の形を手順番号ごとに比較すると、操作の入力を重ねるごとに紐図形は実際の紐の形とは異なっていくように見える。特に、図 3.11 と図 3.12 に示す本ツールにおける「バツタ」完成時の紐図形と実際の紐の形は大きく異なっており、本ツールにおける紐図形は全ての絡み点が紐図形の中心に収束している。これにより、本ツールにおける紐図形は、連結データは正しいにも関わらず実際の「バツタ」を表した紐の形とは異なるように見える。

3.1.3 既存手順説明との比較検証

比較検証では、既存にあるあやとり手順説明と本ツールの 2 種類を見ながら実際にあやとりを行ってもらい、目的の紐の形に至るまでの時間を比較する。既存の手順説明には、株式会社日本パール加工出版の『親子であそべるたのしい!』シリーズ『ひとりあやとり初級編』[19]と『ひとりあやとり上級編』[20]を用いた。

検証において、紐が目的とする紐の形になることを完成と呼ぶ。比較検証は、2

種類の紐の形を目的の紐の形とし、それぞれ別の手順説明を見ながら実際に紐を用いてあやとりを行い、完成したと判断するまでの時間を比較した。時間計測中は完成に至るまで何度でも手順をやり直して良いものとした。また、被験者が自力で完成することが不可能だと判断したときは、それを宣言した時点での経過時間を計測結果とし、完成には至らなかったとした。さらに、被験者が完成を宣言した時点で紐の形が正しい目的の形かどうかを判断し、正しかった場合を正解とした。

検証に用いた手順説明は、文章と本ツール、文章と絵、文章と絵と動画の3種類であり、それぞれの組み合わせをツール、絵、動画と呼ぶ。目的とする紐の形はA、Bと呼び、被験者には名称を伏せて実験を行った。実験は15人の被験者を対象に行った。手順説明の方法と目的とする紐の形の組み合わせと実験人数を表3.5、表3.6に、完成し正しかった場合の平均所要時間を表3.7に示す。

表 3.5: 組み合わせごとの実験者数

	人数
A ツール、B 絵	4
A 絵、B ツール	4
A ツール、B 動画	4
A 動画、B ツール	4

表 3.6: 手順ごとの実験者数

	合計	完成者	正解者
A ツール	8	7	5
B ツール	8	7	3
A 絵	4	4	4
B 絵	4	2	2
A 動画	4	4	4
B 動画	4	2	2

表 3.7: 正解した場合の平均所要時間 (mm:ss)

	A	B
ツール	06:24	08:20
絵	01:15	05:04
動画	01:36	02:34

正解した場合の平均所要時間は、A は絵が最短、B は動画が最短となった。一方で被験者のコメントでは、「ヒモが赤くなるのはわかりやすい」「ヒモを指から

抜くとき途中結果が見れるのはいい」等の意見があった。

3.2 考察

本節では、動作検証と比較検証から分かったことと問題点について述べる。初めに、動作検証について考察を述べる。紐図形を連結データで見たとき、本ツールで生成する紐図形は実際の紐と等しい位相状態であることがわかった。しかし、実際とは紐の形が異なる理由として、本研究では常に紐図形を安定化している点を推測できる。あやとりでは、紐が物理的には安定状態ではない状態を完成形とすることがある。目的の形が物理的に不安定な状態である場合、本ツールではその状態を超えて安定状態になった後の紐図形を表示する。よって本ツールで表示する紐図形が、目的の形とは異なった形の紐図形に見えてしまう。図3.14は「バツタ」完成時の状態から、両手を少しずつ外側にずらした後の紐の状態を示している。この状態は、本ツールにおいて「バツタ」の完成状態を示す紐図形と酷似している。

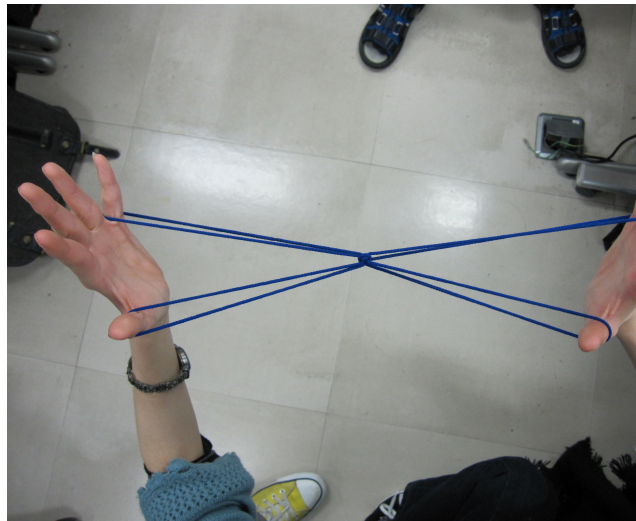


図3.14: 「バツタ」完成状態をさらに引っ張った状態

さらに推測できる理由としては、本研究において紐の長さが可変である点であ

る。紐の長さが可変であると紐図形の安定化に条件がなく、本来なら安定状態であるはずの紐図形を安定状態だと判断できない場合がある。よって必要以上に安定化処理を繰り返してしまい、実際の紐の形とは異なる形に見えてしまうと推測できる。

次に、比較検証について考察を述べる。実験において、本ツールを用いてあやとりを行うことの優位性は出なかった。この理由として、紐図形の見た目が実際の紐の形とは異なること、目的紐、操作内容の指示に明確さが足りないことが原因であると推測できる。まず、紐図形の見た目が実際の紐の形とは異なると、ユーザーは自分で今の紐の形が正しい形かどうかを確認することができない。そのため間違った操作を行っても、そのことに気づかずに次の操作を行い、誤った形で完成したと判断した場合があった。逆に、正しい操作を行っても、見た目の形が異なっていることで誤った操作をしたと思ってやり直す場合もあった。

目的紐の指示では、視点の角度により目的紐が見えにくい場合や、指と被ってしまうことがあったため、目的紐を間違えてしまう場合があった。操作内容の指示では、「外す」操作を行う際の紐の外し方を間違える場合が多く、操作の指示が不明確であったことが推測できる。

また、ツールを用いた場合に完成までの時間が長くなってしまった理由として、ツールでは必ず、ユーザーがツールを操作する時間が必要であることも推測できる。

第 4 章

まとめ

本研究では、既存のあやとり手順の説明では取る紐が分からない、取り方がわからないなどの問題があることに着目し、紐に対して行う操作をより明確に示すことで、あやとりの手順理解が早まると推測した。紐に対して行う操作をより明確に示すため、あやとりを 3DCG を用いて表現した。これにより、まずユーザーが任意の方向から手と紐の状態を確認することが可能になった。さらに、操作の対象になる紐を、紐の他の部分とは色を変えて表示することで、明確化を図った。また、操作を行う様子を明確化するため、1つの操作を行う様子を操作途中の状態からアニメーションで示した。

本研究では、上記の機能を実装したあやとりナビゲーションツールを実際に開発し、その効果を検証した。まず、あやとりの 3DCG 表現について、その正確さを検証した。検証の結果、実際の紐の形は物理的に不安定な状態である場合でも、本ツールでは安定化した後の紐の形を表示するため、実際の紐の形とは異なって見える場合があることがわかった。また、紐の長さを可変にしたことで、紐の安定化に制限がなくなってしまう、必要以上の安定化処理を行っていた。それにより実際とは紐の形が異なる場合があった。

もう 1つの検証として、既存の手順説明と本研究で制作したツールを用いて、実際にあやとりを行う際の手順理解の早さを比較した。検証は制作したツール、絵、動画の 3種類の手順説明方法で比較を行った。検証の結果制作したツールに優位性

は出なかったが、その理由として、表示上の紐の形が実際の紐の形とは異なる点、操作を行う様子が明確に表せていない点が推測できる。操作を行う様子をより明確に示すためには、紐と手の位置関係をより明確にすること、操作を行う様子を表したアニメーションを前後の紐の形と繋げることが必要だと推測できる。また、動画のように説明が一定の時間で自動に進むようにすることで、ユーザーがツールを操作する手間を省き、完成までの時間短縮に繋がるのが推測できる。

本研究では、推測とは異なり、制作したツールでは必ずしも手順理解を早めることは出来なかった。しかし、3DCGを用いたあやとりの手順説明には、既存の手順説明にはない利点があることもわかった。今後の展望としては、今回の問題を解決し、正確な手や紐の状態を表示できるようにすることが先決である。また、操作の制限をなくすこと、扱う操作を増やすことでより複雑な紐の形を表現できるようになり、3DCGによる手順説明の利点を大いに発揮できるようになると推測できる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、講師の渡辺先生、三上先生を始め同研究室の院生の方々には大変お世話になりました。いつも遅刻してごめんなさい。また、同じく研究に勤しんだ友人たち、特に SSA と後ろの人には本当にお世話になりました。忙しい中実験に参加してくれたサークルのみんな、他研究室の皆さんにもお世話になりました。全ての方々に対し、この場を借りて厚くお礼申し上げます。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] シシドユキオ, 野口廣, マーク・A・シャーマン, 建築・都市ワークショップ, 七字由宇, "世界あやとり紀行—精霊の遊戯", INAX 出版, 2006.
- [2] 野口 広, "やさしいあやとり—親子で遊ぼう!伝統あやとりと、新作あやとり", 主婦の友社, 2004.
- [3] 野口廣, "大人のあやとり—ひも 1 本で脳力活性化!家族みんなで遊べる!", 主婦の友社, 2007.
- [4] International String Figure Association, <http://www.isfa.org/isfa.htm>.
- [5] Eric Lee, St.David,AZ, "A Shorthand Notation for Recording STRING FIGURE", <http://www.alysion.org/figures/notation.htm>.
- [6] 山田雅之, RHAHMAT BUDIARTO, 伊藤英則, 世木博久, "アヤトリにおけるひも図形変形過程の表現とその処理", 情報処理学会論文誌 Vol.35 No.3, 1994.
- [7] 杉山貴, 山田雅之, 伊藤英則, 世木博久, "遺伝的アルゴリズムによるあやとり図形生成 紐デザイン処理 (2)", 情報処理学会全国大会講演論文集 第 48 回平成 6 年前期 (2), 1994.
- [8] 山田雅之, RHAHMAT BUDIARTO, 世木博久, 伊藤英則, "アヤトリ図形のトポロジカルな性質と結び目多項式による特性化", 情報処理学会論文誌 Vol.38 No.8, 1997.

- [9] 伊藤英則, 山田雅之, 中村剛士, ”結び目、自己相似などを用いたグラフィック処理について”, 情報処理学会研究報告. グラフィクスと CAD 研究会報告, 2001.
- [10] 小泉智史, 西田誠幸, ”あやとり表記法を入力とするあやとりの平面図生成ツールの開発”, 情報処理学会第 71 回全国大会, 2009.
- [11] ニンテンドー DS 用ソフト ”見ながら折れる DS おりがみ”, TDK コア株式会社, 2007.
- [12] intex, ”手話学習ソフトウェア 手話ロボットオアフ君”, <http://int.moo.jp/>.
- [13] 仲達史, 辻合秀一, 長江貞彦, ”実測した毛糸の 3 次元表示”, *Memoirs of the School of Biology-Oriented Science and Technology of Kinki University* 16, 2005.
- [14] 村杉邦夫, ”結び目理論とその応用”, pp.40~pp.42, 日本評論社, 1993.
- [15] 村上斉, ”結び目のはなし”, pp.111~pp.132, 遊星社, 1990.
- [16] 伊藤裕一郎, ”紐状物体における 3 次元グラフィックス生成表示手法に関する研究”, 名古屋工業大学博士論文, 2001.
- [17] 岩田至康 (編), ”幾何学大辞典, 2 基本定理と問題 空間”, pp.234, 槇書店, 1974.
- [18] 渡辺大地, ”Fine Kernel Tool Kit System.”, <http://fktoolkit.sourceforge.jp/>.
- [19] ”親子であそべるたのしい!ひとりあやとり初級編”, 株式会社日本パール加工, 2009.
- [20] ”親子であそべるたのしい!ひとりあやとり上級編”, 株式会社日本パール加工, 2009.

付録 A

あやとり表記法記述一覧

T	親指	pu	取る	mr	右から		
F	人差し指	gr	引っかける (握る)	ml	左から		
M	中指	re	外す	ma	遠ざける		
R	薬指	pt	引っ張る	mt	近づける		
L	小指	tw	ねじる	mo	上から		
N	輪	ht	張る	mu	下から		
S	糸	kl	ゆるめる	md	下げる		
P	掌	ls	ずらす	up	上げる		
H	手	ex	両手を開く	qu	素早く		
W	手首	na	ナバホ取り	ar	周り		
O	口	tr	移す				
DS	斜めの糸	th	通す	r	右	l	左
SS	まっすぐな糸	fl	ひっくり返す	n	手前	f	奥
XS	交差した糸	bt	間を通す	t	1番上	b	1番下
CS	中心の糸	de	押し下げる	c	真ん中	d	背

表 A.1: あやとり表記表一覧