

平成20年度

筑波大学第三学群情報学類

卒業研究論文

題目 粘土と針金による工作を模した
ラフデザインモデリング

主専攻 情報科学主専攻

著者 森 有司

指導教員 志築文太郎 高橋伸 三末和男 田中二郎

要 旨

ラフデザインは、デザインの検討段階における情報共有や試行錯誤的な検討などを行うための重要な要素である。本研究では三次元モデルのラフデザインに焦点をあて、これを支援する三次元モデラを設計し、実装をした。本研究で設計・実装したモデラの特徴は、三次元モデルの作成を“粘土と針金を変形し組み合わせて作る工作”に模して行うことにある。粘土・針金は多くの人にとって触れた経験のあるもので、変形することや組み合わせることの想像が容易なものであるから、これらを模することでモデルの操作は自然に感じられる簡潔なものになると考えられる。この操作の自然さ、簡潔さは、検討段階におけるデザインの試行錯誤を支援する。

目次

第1章 序論	1
第2章 ラフデザインモデラの設計	2
2.1 操作の設計	2
2.2 入力装置の設計	5
第3章 ラフデザインモデラの試作	6
3.1 モデラの操作	6
3.2 ラフデザインモデラの実装	15
3.2.1 処理の流れ	15
3.2.2 モデルデータの構成	17
3.2.3 パーツの操作	19
パーツの内外判定	19
移動	20
粘土パーツの変形	21
針金パーツの変形	21
グループ化・解除	27
第4章 関連研究	30
第5章 今後の課題	31
第6章 結論	32
謝辞	33
参考文献	34

図目次

2.1	粘土と針金による工作例	2
2.2	動作環境	2
2.3	UI の概観	3
2.4	パーツ生成	3
2.5	粘土パーツの変形操作	4
2.6	針金パーツの変形操作	4
2.7	粘土パーツと針金パーツのグループ化操作	4
2.8	グループ内の針金パーツの変形操作	4
3.1	作成したモデラの概観	7
3.2	入力用マーカー	8
3.3	モデラのシステム構成	9
3.4	モデラの利用イメージ	10
3.5	パーツとカーソル	10
3.6	移動操作	11
3.7	グループの移動操作	12
3.8	粘土パーツと針金パーツのグループ化操作	13
3.9	グループの切り離し操作	13
3.10	粘土パーツの変形操作	14
3.11	針金パーツの変形操作	14
3.12	グループ内の針金パーツの変形操作	15
3.13	モデラの処理の流れ	16
3.14	ARToolkit による位置の取得	16
3.15	粘土パーツの形状データ	18
3.16	針金パーツのデータ	18
3.17	パーツ間接続データ	19
3.18	粘土パーツを変形する際のモデルの更新イメージ	22
3.19	更新頂点計算のイメージ	22
3.20	l_0 、 l_1 に対する移動係数 w_0 、 w_1 のグラフ	23
3.21	針金パーツを変形する際のモデルの更新イメージ	24
3.22	針金パーツの変形時のグループの分割イメージ	28
3.23	針金パーツの変形にともなうグループの移動イメージ	29

第1章 序論

簡潔かつ迅速に三次元モデルを作成したい状況がある。たとえば、CGを使った映像制作の初期段階において、作成者達が作成しようとするシーンに対して検討を行う場合やアニメーターがクライアントに対してプロジェクトの状態を説明する場合などである。これらの場合、高い品質のものを作ることより、迅速に三次元モデルのデザインを作成することが求められる。Richard ら [1] は 2D アニメーションツールの設計に際して、アニメーターとその他アニメーション作成を必要とする人に対しフィールドスタディを行い、その中で簡潔でラフなデザインの有用性を示している。

一般的に三次元モデルは、モデルを構成するポリゴンメッシュや自由曲面を、少数の制御点を用いて生成する。一般的なモデラは、押し出しや回転など多数のコマンドを使用するものであり、ユーザはそれらのコマンドを組み合わせて目的のモデルを構成する。こういったインタフェースは、操作に習熟した者が時間をかけ正確なモデルを作成するのに適しているが、迅速にラフデザインを行うためには適さない。

そこで、本研究では三次元モデルのラフデザインを支援するモデラを開発する。ユーザは、粘土と針金に見立てた部品を配置し、変形し、組み合わせる機能を使って、表現したい三次元モデルを形作れる。粘土や針金を変形すること、またそれらを組み合わせることは誰もが経験のあることであり、想像しやすい。そのような工作を模することによって、モデラの操作は、ユーザが想像しやすい自然で簡潔なものになる。さらに本研究ではその操作を、両手を用いて日常的なユーザの経験に沿った直感的な方法にする。これら方法をとることで、モデラは三次元モデルのラフデザインを強く支援することができると考える。

三次元モデルの作成手法を研究しているものには、仮想粘土を用いるもの [2] や手書きスケッチを用いるもの [3][4] などがある。その中で、本研究のモデラはラフデザインを目的とし、特にキャラクターモデルの配置や姿勢の指定が容易であることを特徴とする。

本論文の構成

本章で立てた目的を達成するために本研究ではラフデザインモデラを設計、実装を行う。まずは、ラフデザインモデラの設計について第2章で述べる。次に第3章で、第2章で述べた設計に基づいて実装したモデラの操作とその実装方法について述べる。そして、第4章にて本研究の関連研究を紹介し、第5章で今後の課題について述べた後、最後に第6章でまとめる。

第2章 ラフデザインモデラ的设计

作成するモデラでは、三次元モデルの大まかな形状と姿勢を簡潔に表現する手段として、針金と粘土を模したモデルを使う。図 2.1 は粘土と針金による工作の例である。今回開発するラフデザインモデラでは、三次元モデルを曲線と体積部分の組み合わせとして作成する。以降、このモデラにおける三次元モデルの構成部品をパーツと呼び、特に粘土を模した体積部分を粘土パーツ、針金を模した曲線部分を針金パーツと呼ぶ。

図 2.2 はモデラの動作環境を示す。カメラは固定されており、このカメラを用いて入力装置の三次元的な位置・角度を取得する。入力装置にはクリックのためにボタンが付いており、ユーザは両手にそれぞれ1つずつ入力装置を持ち、操作を行う。

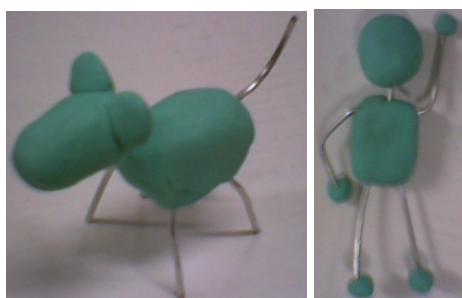


図 2.1: 粘土と針金による工作例

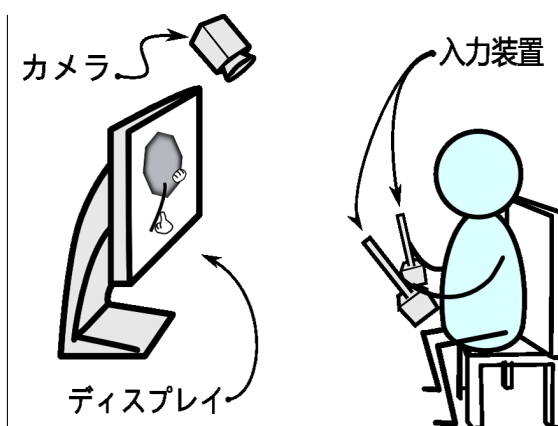


図 2.2: 動作環境

2.1 操作的设计

図 2.3 にモデラの持つ UI の概観を示す。2つのカーソルはそれぞれ1つずつ入力装置と対応づけられる。カーソルは三次元的な位置・角度を持ち、対応する入力装置が動くと、入力装置の位置・角度を反映して動く。ユーザは、カーソルをパーツに合わせた状態で、入力装置のボタンを押下するとそのパーツを掴める。そして、パーツを掴んでいるカーソルをボタンを押下したまま移動することで、そのパーツをドラッグできる。

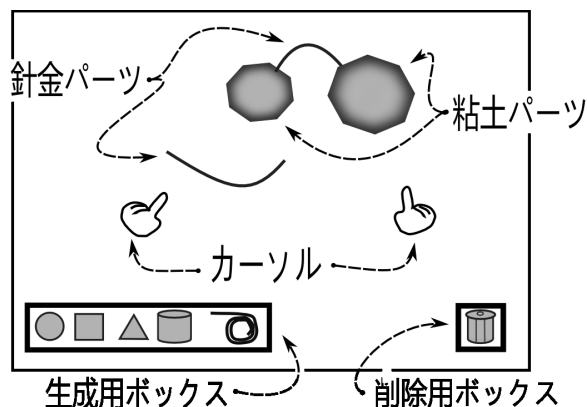


図 2.3: UI の概観

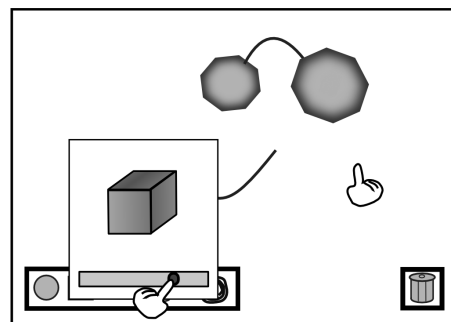


図 2.4: パーツ生成

生成・削除 UI（図 2.3）下部には 2 つのツールボックスが配置されている。生成用ボックスは、形状ごとの粘土パーツ生成アイコン複数と、針金パーツ生成アイコン 1 つを持つ。これらのアイコンがクリックされると、図 2.4 のようなサブウィンドウが表示される。サブウィンドウの中央には、アイコンに対応するパーツのプレビューが表示されている。ユーザは、サブウィンドウ下部のスライダーを使いパーツのサイズを調整し、プレビューされているパーツをサブウィンドウ外にドラッグすることで、そのパーツを生成できる。また、既に配置されているパーツを削除用ボックスにあるゴミ箱アイコンにドラッグすると、そのパーツを削除できる。

移動 粘土／針金パーツの移動にはカーソルを 1 つ用いる。ユーザがカーソルで移動したいパーツをドラッグすると、そのパーツはカーソルに従い移動する。後述のグループ化されたパーツでは、そのグループを構成しているパーツのうち 1 つが移動するとき、同時にグループ全体のパーツが位置関係を保ったまま移動する。

変形 パーツの変形には、カーソルを 2 つ用いる。粘土／針金パーツいずれの変形も、パーツ中の 2 点をドラッグすることで行う。実際の粘土や針金を変形させるときには、両手で持って力を加えることが多いことから、両手のカーソルを使う変形操作は、ユーザが自然に感じられると期待できる。

図 2.5 に粘土パーツの変形操作を示す。図 2.5a は変形前の粘土パーツである。片方のカーソル（左）は既にパーツを掴んでいる。図 2.5b,c はカーソル（右）を赤矢印通りにドラッグした結果である。図 2.5b ではパーツの 1 点を引っ張り、c では押し込んでいる。

図 2.6 に針金パーツの変形操作を示す。図 2.6a は変形前の針金パーツである。ユーザは、まず、変形したい針金パーツを両方のカーソルで掴む（図 2.6b）。図 2.6c,d は、その後にカーソルを赤矢印通りにドラッグした結果である。図 2.6c では両カーソルを回転させながら下方にドラッグし、パーツを山なりに折り曲げている。そして、図 2.6d では左のカーソルを動かさ

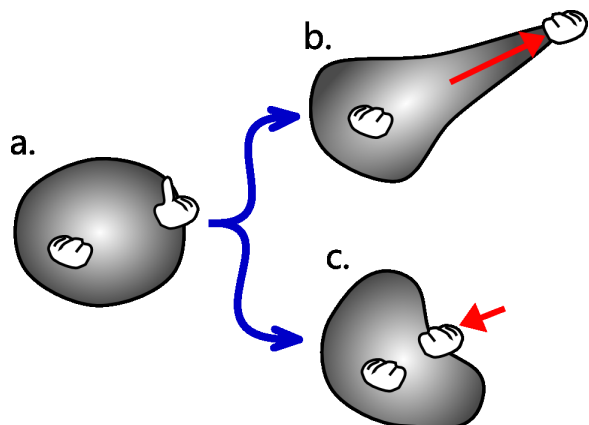


図 2.5: 粘土パーツの変形操作

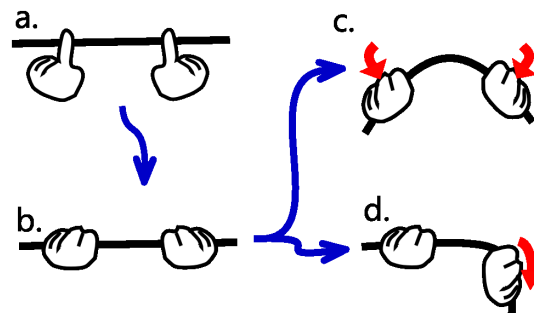


図 2.6: 針金パーツの変形操作

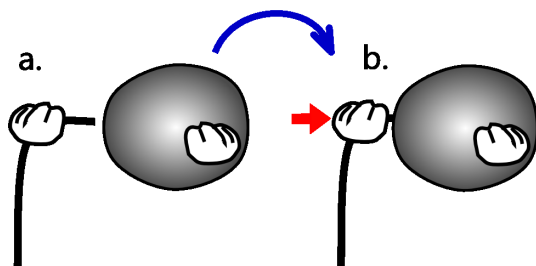


図 2.7: 粘土パーツと針金パーツのグループ化操作

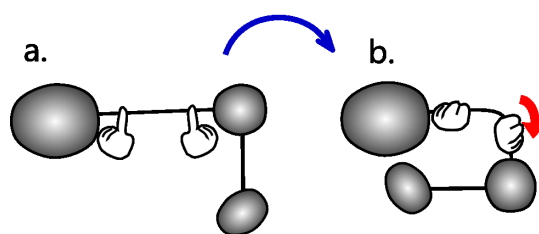


図 2.8: グループ内の針金パーツの変形操作

ずに右のカーソルだけを回転させ、パーツを右のカーソル付近で曲げている。

後述のグループ内の針金パーツに対してもこの変形操作は可能である。図 2.8 に両端に粘土パーツの付けられた針金パーツの変形を示す。図 2.8 のように、変形する針金パーツの両端にある粘土パーツは、両端と位置関係を保って移動する。この変形操作はモデルの姿勢を検討する際に有用となる。例えば、図 2.1 右のような人形のモデルを作成する場合、腕や脚を針金パーツで作れば、様々な姿勢をとらせることができるようになる。

グループ化・切り離し 実際の粘土と針金による工作では、変形させた粘土と針金を組み合わせる。たとえば図 2.1 左の犬の例では、犬の頭は3つの粘土を繋ぎ合わせており、また尻尾となっている針金は胴体となっている粘土に差し込まれている。

このモデラでは、粘土パーツと針金パーツ、または粘土パーツと粘土パーツを組み合わせ、グループにできる。2つのパーツを別々のカーソルで掴み、押し付ける方向にドラッグす

ることで、その2つのパーツをグループにする。図2.7に、粘土パーツと針金パーツをグループにする様子を示す。図2.7aはパーツをグループにする前の状態であり、図2.7bは赤矢印通りにドラッグすることによってパーツをグループにした後の状態である。

グループになったパーツを切り離すには、即ち切り離したいパーツ2つをそれぞれカーソルで掴み、引き離す方向にドラッグすればよい。

2.2 入力装置の設計

設計したラフデザインモデルの操作には、三次元的な位置・角度の検出とボタン入力が必要な入力装置が片手に1つずつ計2つ必要となる。本研究では、この条件を満たす安価な入力装置を作成し、使用する。

第3章 ラフデザインモデラの試作

図 3.1 は第 2 章で述べた設計を元に作成したモデラの概観である。

モデラは入力装置とそれを撮影するカメラを必要とする。図 3.3 に示すように、カメラを常に入力装置が捉えられる様に配置する。入力装置は図 3.2 に示すもので、各入力装置は位置検出用の 1 つのマーカとボタン用の 1 つのマウスを組み合わせたものである。ユーザはこの入力装置を用いてモデラを操作する（図 3.4）。

ユーザは入力装置を、図 3.2 のように片手にひとつずつ計 2 個持つ。各入力装置の位置を取得するために、ARToolkit[5] を使用する。このマーカは入力装置に 1 つずつ取り付けられる。マーカは入力装置ごとに異なるものを取り付けるため、各入力装置はマーカによって識別される。マーカの位置を撮るためのカメラは、各入力装置のマーカが常に 1 つずつ以上撮れる位置に固定される。また、クリック用のボタンとして、マウスが入力装置にひとつ取り付ける。

図 3.5 に示すのは、モデラの構成要素である。ユーザは、図 3.5 中の 2 つカーソルを入力装置を通じて操作し、針金パーツと粘土パーツを複数組み合わせる目的の形状を作る。また、図 3.5 に示す針金パーツと粘土パーツはそれぞれの初期状態であり、ユーザは針金パーツを曲げる、粘土パーツを押し込む／引っ張るといった、直感的な変形を行うこともできる。

3.1 モデラの操作

ユーザはカメラと入力装置をシステムに接続し、モデラを起動し、その後入力装置のキャリブレーションを行う。キャリブレーションはカメラ中の基準となる位置にマーカを写した状態でキー入力することで完了する。

起動後は、ユーザはカーソルを通じてパーツを操作することで、モデリングを行う。カーソルはユーザの持つ、マーカの付いた入力装置の動きに追随する。各種操作を行うために、カーソルを操作したいパーツに重ね、その状態で入力装置のボタンを押すことでパーツを掴む。ボタンが押されている間、カーソルはパーツを掴み続ける。

ユーザは 1 つのカーソルでパーツを掴むことで、パーツを手を持つように移動させることができる。図 3.6 はカーソルによるパーツ移動操作のスナップショットである。図の①から④は一度の連続した移動であり、カーソルで掴んだパーツを右に移動させながら斜めに傾けるように動かしている。またこの時、掴んでいるパーツがグループ化されているならば、図 3.7 のようにそのグループ全体が移動する。移動を終えた時に、図 3.8 別々に掴まれた粘土パーツと針金パーツが重ねられると、それらパーツが接続されグループとなる。また図 3.9 のよ

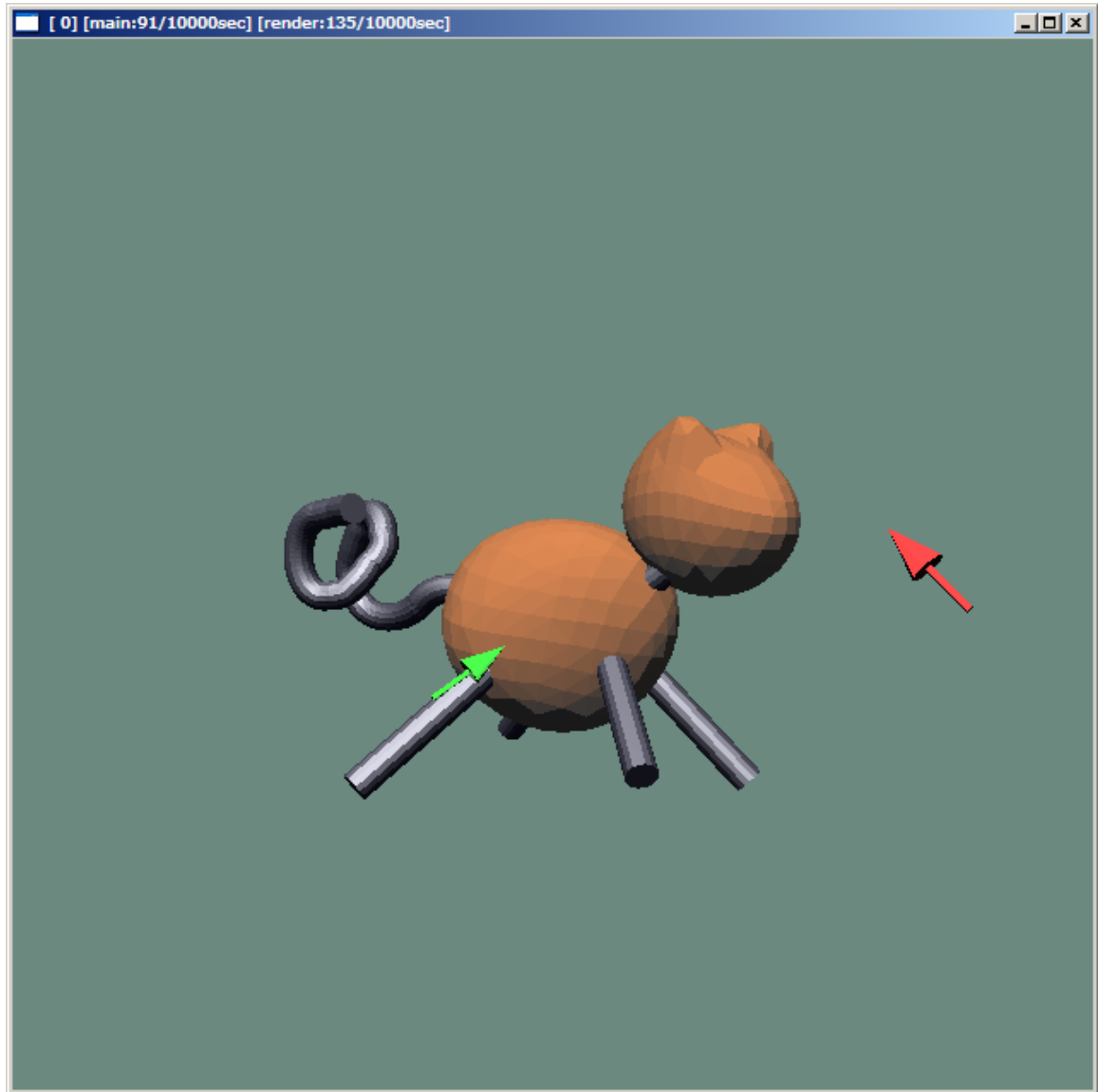


図 3.1: 作成したモデルの概観



図 3.2: 入力用マーカー

うに、グループ内の異なるパーツを別々にカーソルで掴んだ場合、グループが2つに分割される。

ユーザは2つのカーソルで同一のパーツを掴むことで、そのパーツを直感的に変形することができる。変形の仕方はパーツの種類によって異なる。図 3.10 は、粘土パーツが変形する様子を示している。図 3.10a が、変形前の粘土パーツの状態である。この粘土パーツを両カーソルで掴み、図 3.10b のように赤カーソルを引っ張るように動かすことで、粘土パーツは図 3.10c のように変形される。また、図 3.10d のように赤カーソルを押し込むように動かすことで、粘土パーツは図 3.10e のように変形される。

図 3.11 は、針金パーツが変形する様子を示している。図 3.11a が、変形前の針金パーツの状態であり、図 3.11b は針金パーツを両カーソルで掴んだ状態である。この状態から図 3.11c では針金パーツを山なりに変形させ、図 3.11d では赤カーソルの付近で角度をつけるように変形させている。また、変形させた針金パーツがグループ化されているときには、接続されたパーツが接続位置に応じて位置関係を保つように移動する。図 3.12 はグループ化された針金パーツを変形する様子を示している。図 3.12a が変形前の状態であり、水平に置かれた針金パーツは中央に1つ、右端に1つの粘土パーツと直接接続している。この状態から水平に置かれた針金パーツを変形すると、接続されたパーツが図 3.12b のように位置関係を保って移動する。

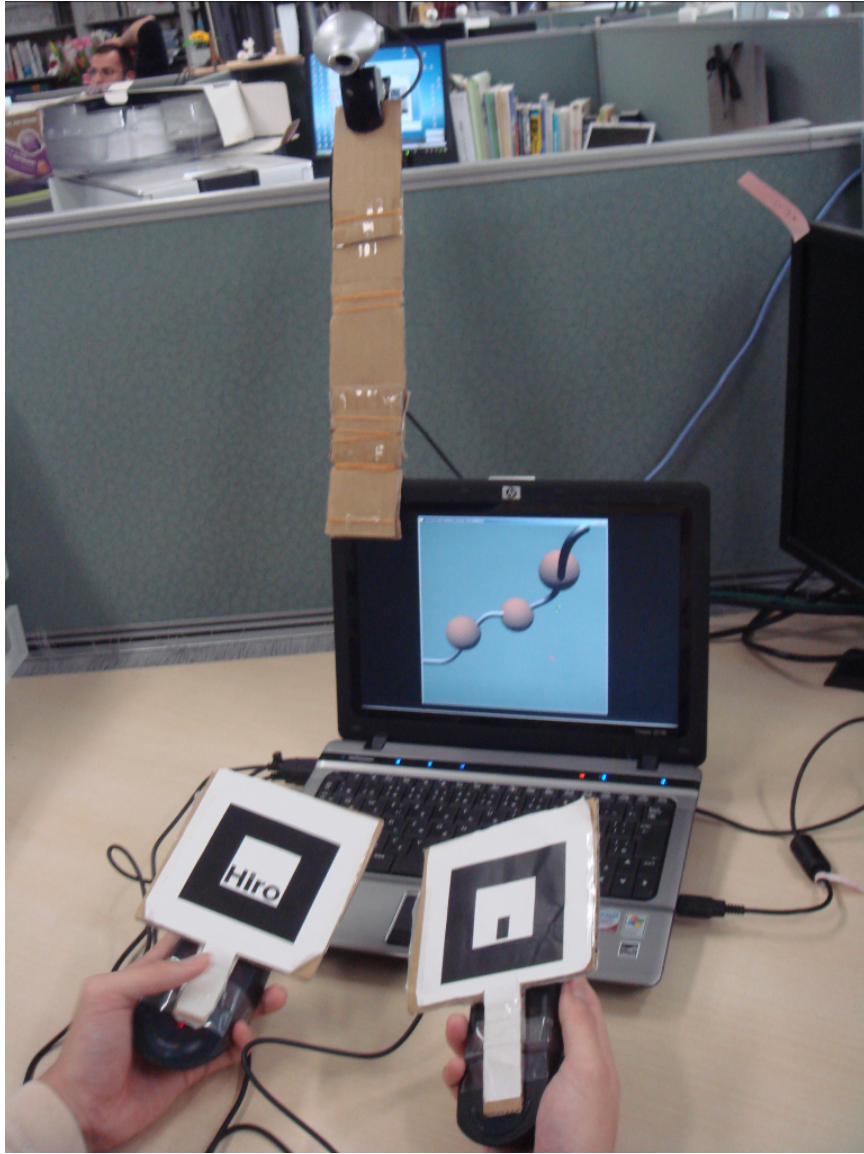


図 3.3: モデラのシステム構成



図 3.4: モデラの利用イメージ

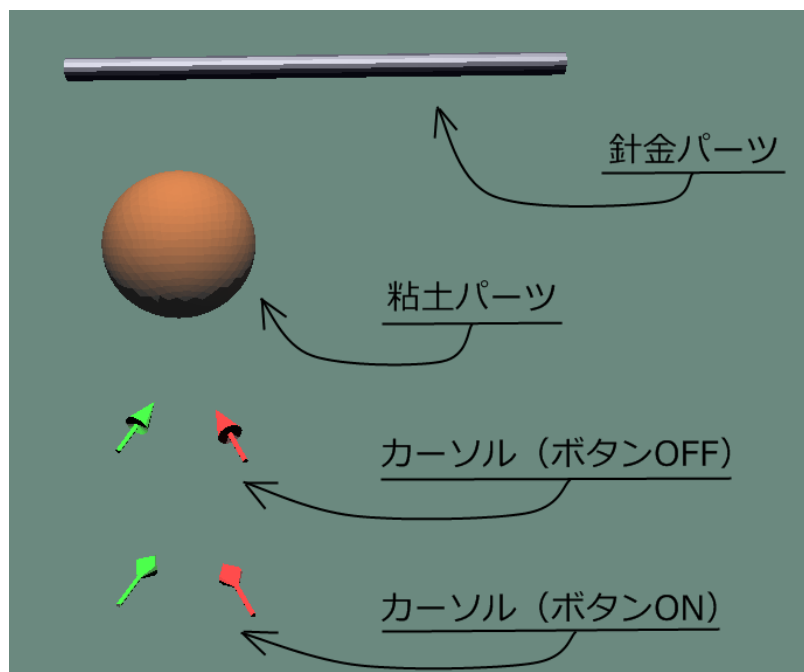


図 3.5: パーツとカーソル

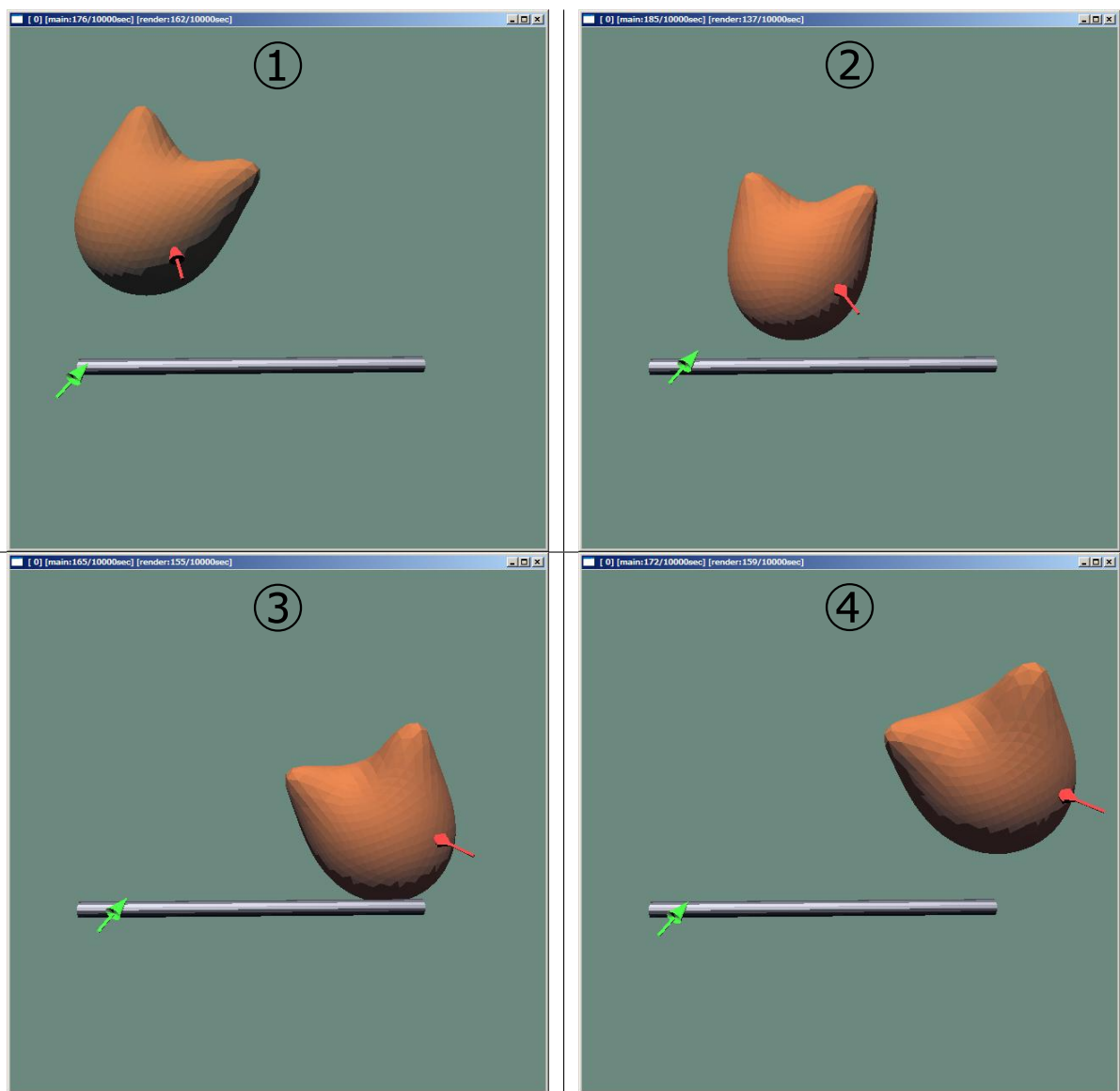


図 3.6: 移動操作

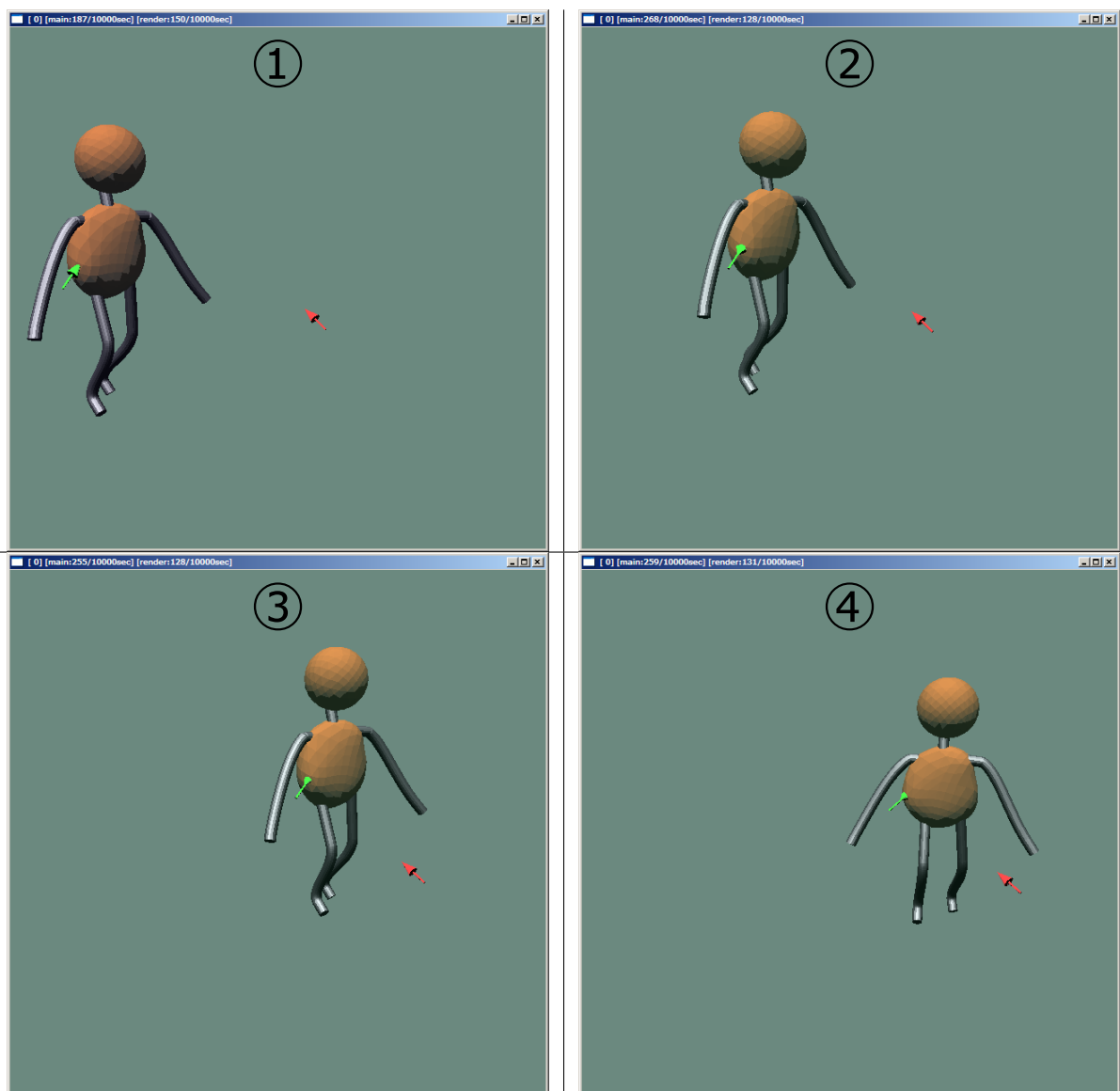


図 3.7: グループの移動操作

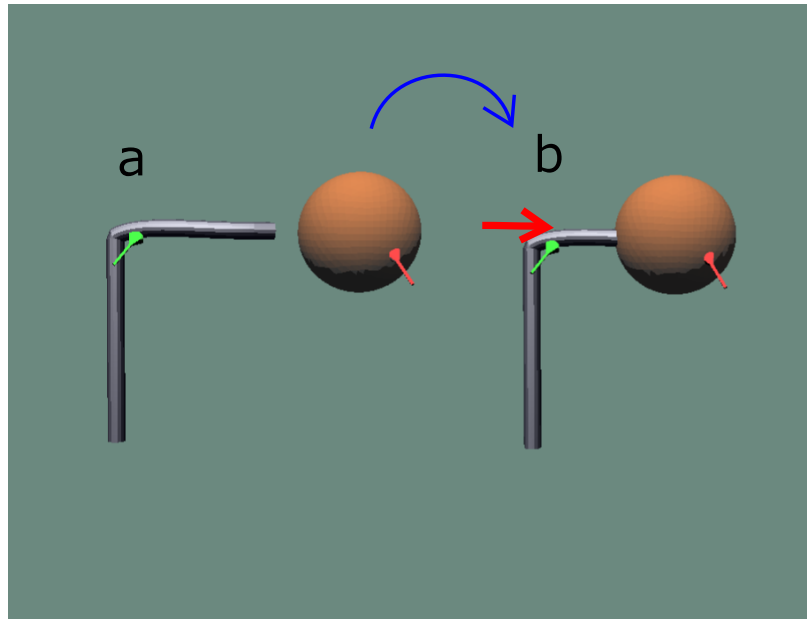


図 3.8: 粘土パーツと針金パーツのグループ化操作

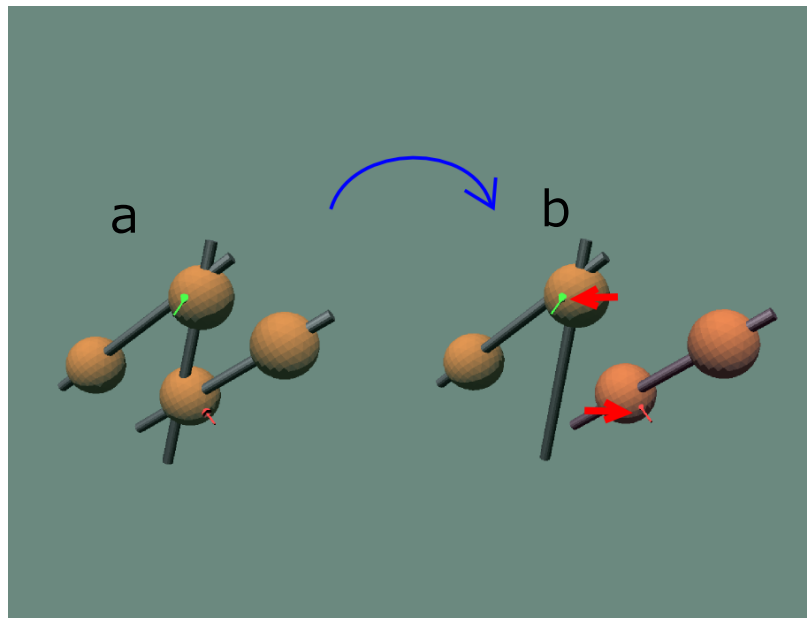


図 3.9: グループの切り離し操作

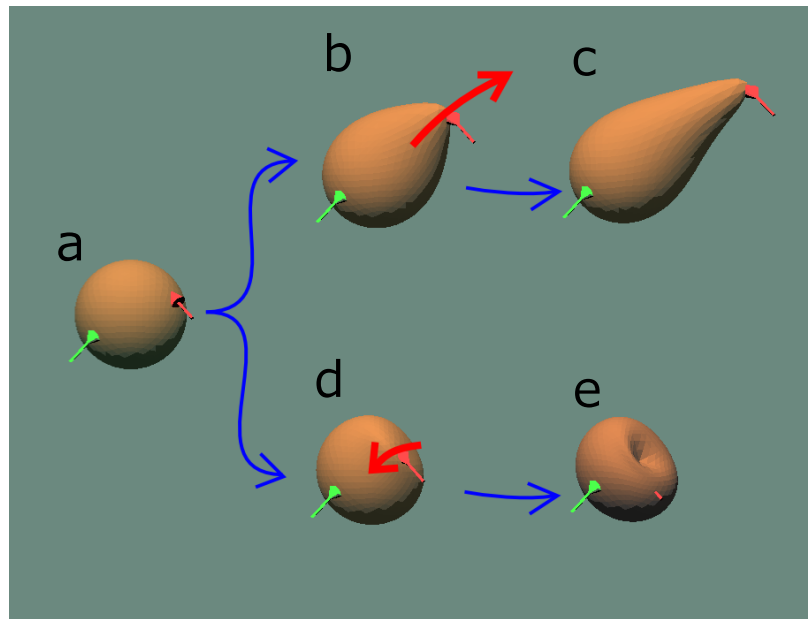


図 3.10: 粘土パーツの変形操作

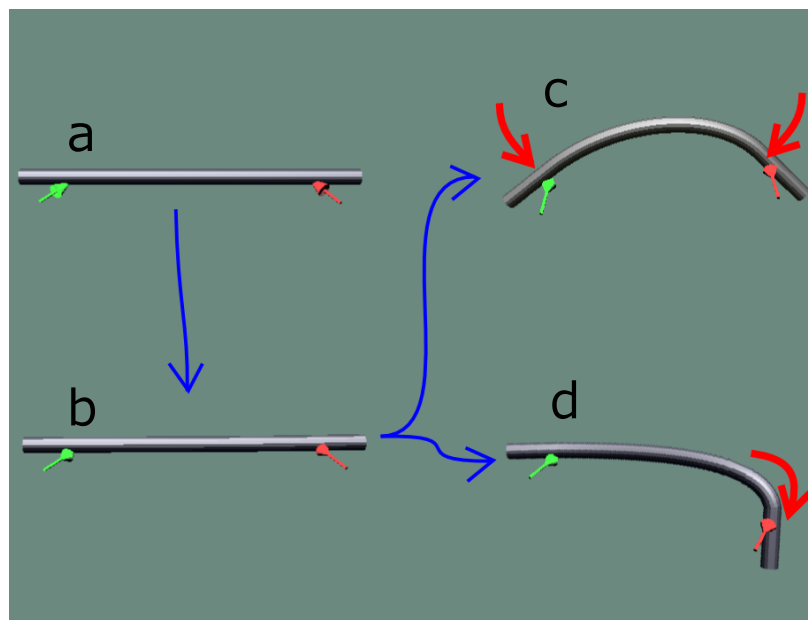


図 3.11: 針金パーツの変形操作

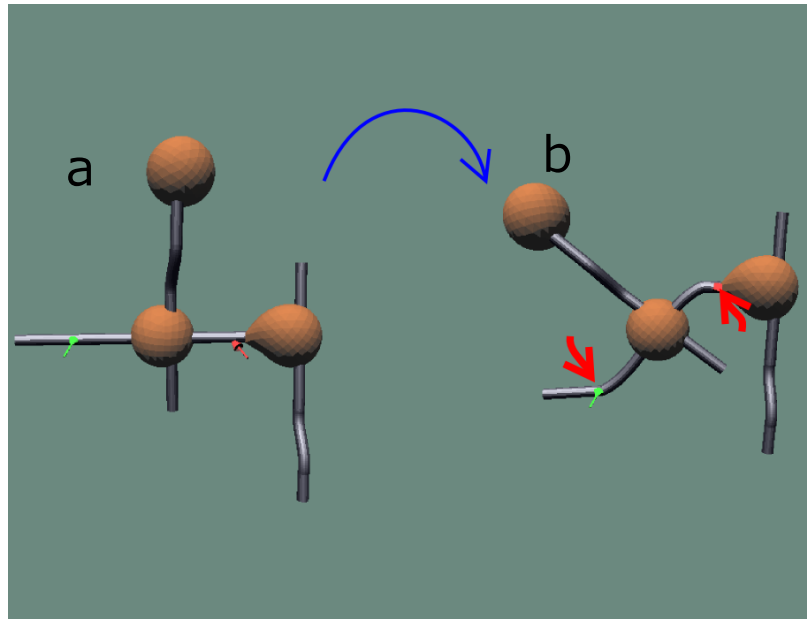


図 3.12: グループ内の針金パーツの変形操作

3.2 ラフデザインモデラの実装

以下に、作成したモデラの実装についてその詳細を述べる。まずモデラの処理の流れの概略を示し、モデルのデータ構造について述べた後、各種操作の処理の実装を詳細に述べる。

3.2.1 処理の流れ

図 3.13 はモデラの起動後の処理の流れを図示したものである。モデラを起動時に初期化処理を行い、その後はフレーム処理を繰り返す。

初期化処理 初期化処理としては、モデラの使用するライブラリ（ARToolkit、DirectX）の初期化に続いて、入力装置のキャリブレーションを行う。

入力装置のキャリブレーションは、入力装置の動きとモデラのカーソルの動きを同期させるために行う。ユーザが入力装置の原点をマーカーを用いて指定することで、入力装置に付いているマーカーの位置・角度と対応するカーソルの位置・角度を同期させる。

図 3.14 中の $C_{original}$ 、 $C_{current}$ のように、ARToolkit から得られる情報は、カメラから各マーカーへの座標変換行列である。キャリブレーション時には、カメラから 1 つのマーカーへの行列 $C_{original}$ を記録し、基準の行列として使用する。これを用いると、モデル内の空間では行列 $T = C_{current}C_{original}^{-1}$ がカーソルの位置・角度になる。

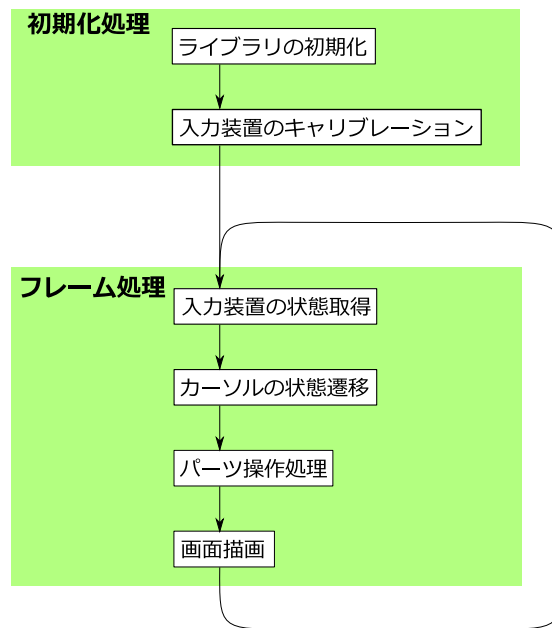


図 3.13: モデラの処理の流れ

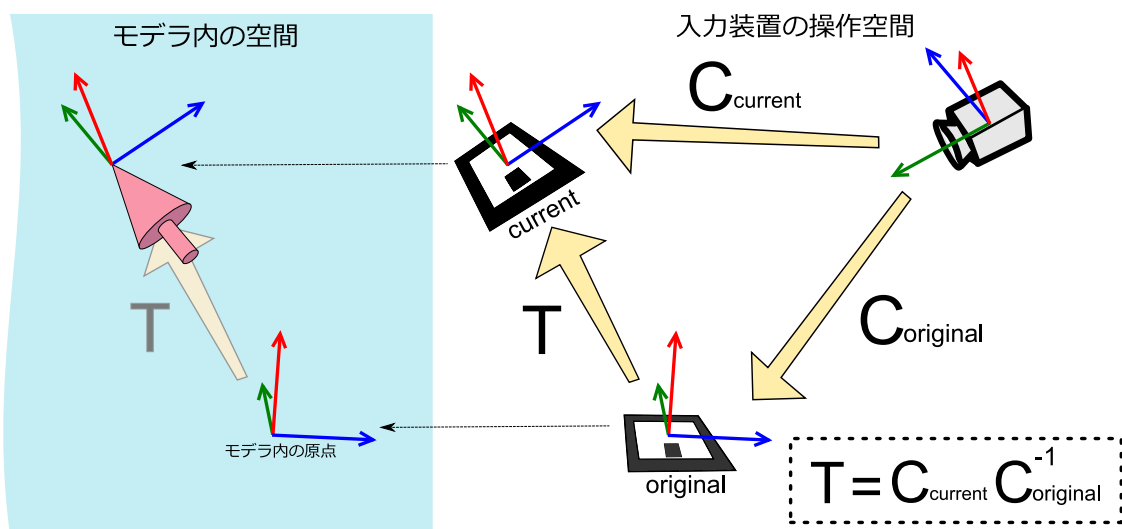


図 3.14: ARToolkit による位置の取得

フレーム処理 1 フレーム中の処理は以下の手順となる。

1. 入力装置の位置・ボタンの状態を調べる。

前述の図 3.14 のように、カーソルの位置行列 T は、初期化処理内のキャリブレーションにおいて設定したマーカー (original) への行列 $C_{original}$ と各フレーム時のマーカーへの行列 $C_{current}$ から計算される。また、ボタンの状態を各カーソルの見た目に反映する。

2. 各カーソルの位置とボタンの状態を元に、各カーソルの状態を決定する。

- カーソルの状態は、Free・Grab・Release の 3 状態のいずれかをとる。
- カーソルの初期状態は Free である。
- カーソルの状態が Free の時にボタンが押された (Off から On) 時、そのカーソルの位置が各パーツと重なっているかを判定する。重なっているパーツがある場合、カーソルの状態は Grab へ遷移し、カーソルはこのパーツを掴んでいるとする。
- カーソルの状態が Grab の時にボタンが離された (On から Off) 時、カーソルの状態は Release に遷移する。
- カーソルの状態が Release の時は、Free に遷移する。

3. 各カーソルの状態に応じて、掴んでいるパーツの操作処理をする。

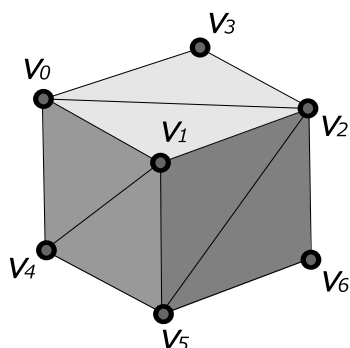
パーツの操作には移動と変形、グループ化とその解除がある。移動と変形は、カーソルの状態が Grab であるときに行われる。両カーソルが同一のパーツを掴んでいる場合にはそのパーツを変形し、そうでない場合には各カーソルが掴んでいるパーツを移動する。またグループ化とその解除は、一方のカーソルの状態が Release でありもう一方が Grab である時に、さらに各カーソルが異なるパーツを掴んでいる場合に行われる。

4. 各パーツとカーソルのレンダリングを行う。

3.2.2 モデルデータの構成

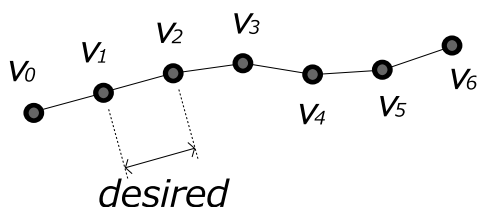
モデラで使用されるモデルデータの構成について述べる。モデラで作成するモデルデータは粘土パーツと針金パーツの 2 種類のパーツと、パーツ間の接続データで構成される。以下に各要素のデータについて述べる。またモデラ中の頂点の座標はすべて、同一の座標系上にある。

粘土パーツ 図 3.15 は粘土パーツの形状データの構造を図示したものである。図 3.15 に示すように、粘土パーツの形状はポリゴンメッシュであり、頂点座標の配列 *Vertices* と、その内の 3 頂点への参照であるインデックスの配列 *Indices* をデータとして持つ。各インデックスに参照される 3 頂点を結んだ三角形の面を張り合わせたポリゴンメッシュとして形状を定義する。



$$\begin{aligned}
 \text{Clay} &= (\text{Vertices}, \\
 &\quad \text{Indices}) \\
 \text{Vertices} &= (v_0, v_1, v_2, \dots) \\
 \text{Indices} &= \{ \\
 &\quad (0, 2, 1), \\
 &\quad (2, 0, 3), \\
 &\quad \vdots \\
 &\quad \}
 \end{aligned}$$

図 3.15: 粘土パーツの形状データ



$$\begin{aligned}
 \text{Wire} &= \text{Vertices} \\
 \text{Vertices} &= (v_0, v_1, v_2, \dots) \\
 \text{DesiredInterval} &= \text{desired}
 \end{aligned}$$

図 3.16: 針金パーツのデータ

針金パーツ 図 3.16 は針金パーツの形状のデータ構造を図示したものである。図 3.16 に示すように、針金パーツの形状は繋がれた線分集合であり、頂点座標の配列 *Vertices* をデータとして持ち、この配列内の頂点を順に結んでできる繋がれた線分集合として、針金パーツの形状を定義する。また、変形時に針金パーツの長さを一定に保つために、各頂点間の理想的な距離 *DesiredInterval* が設定されており、針金パーツを変形する際にこの距離を保とうとする。描画時には、各線分を中心とした一定の半径の円柱ポリゴンとして描画される。

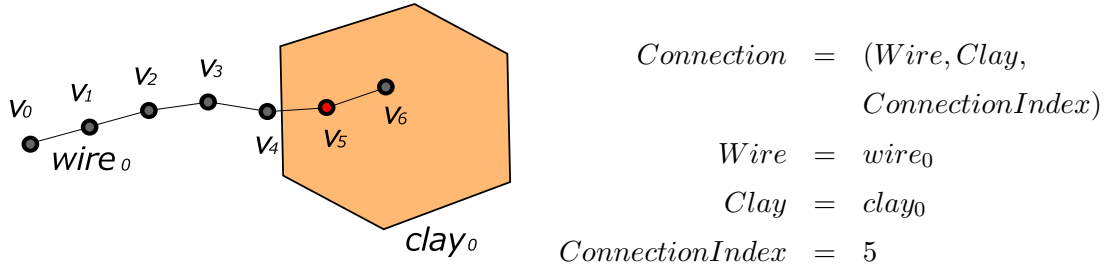


図 3.17: パーツ間接続データ

パーツ間接続データ 図 3.8 で示したように各パーツを接続することで、それらパーツをグループ化することができる。図 3.7 や図 3.12 で示したように、グループ化されたパーツはその接続関係を維持するようになる。

このグループを表現するために、図 3.17 に示すようにパーツ間接続として、接続された粘土パーツと針金パーツそれぞれの参照 $Wire$ 、 $Clay$ を記録する。また、針金パーツの 1 頂点を選び接続頂点として、その頂点のインデックス $ConnectionIndex$ を記録している。記録した接続頂点は針金パーツ変形時に、変形された針金パーツとその針金パーツに直接接続している粘土パーツの接続位置・角度を維持する際に使用する。このパーツ間接続は描画されないデータである。

3.2.3 パーツの操作

カーソルを通じたパーツの操作について詳細に述べる。以降では、二つのカーソル $Cursor_i (i = 0, 1)$ に対して、 $Cursor_i$ の現フレームの位置行列 (4×4) を $T_{i,current}$ 、1 つ前のフレームの位置行列を $T_{i,previous}$ と表記する。また、位置行列 $T_{i,X}$ の回転成分の行列 (3×3) を $R_{i,X}$ 、平行移動成分のベクトルを $t_{i,X}$ とする。

パーツの内外判定

カーソルでパーツを掴む判定のため、またグループ形成の判断として使用するパーツ間衝突判定のために、各パーツには点との内外判定が定義されている。カーソル $Cursor_i$ とパーツとの重なり判定は、 $t_{i,current}$ がパーツの内側にある場合に、カーソルとパーツは重なっていると判断する。また、針金パーツと粘土パーツの衝突判定は、針金パーツの頂点のうち 1

つ以上が粘土パーツの内側にある場合、衝突しているものと判断する。この時、パーツ間接続データが生成され、その接続頂点として、粘土パーツの内側にある針金パーツの頂点のうち1つが *ConnectionIndex* として記録される。

点との内外判定は、以下のように行われる。

- 粘土パーツ

形状データとの内外判定を行い、その結果を衝突判定結果とする。内外判定はまず、インデックス $(a_0, a_1, a_2) \in Indices$ と頂点 $v_{a_0}, v_{a_1}, v_{a_2} \in Vertices$ によって示される三角形 $(v_{a_0}, v_{a_1}, v_{a_2})$ と点 p との距離を計算し、距離が最小となる三角形 $m = (v_{min0}, v_{min1}, v_{min2})$ を見つける。点 p が三角形 m に対し裏側にある場合、点 p は粘土パーツの内側にあると判定する。

- 針金パーツ

針金パーツの頂点 $v_i \in Vertices (0 \leq i < n)$ に対し、 $0 \leq j < n - 1$ において v_j から v_{j+1} への線分を中心とする判定半径 r の円柱 c_j と点 p との内外判定を行う。点 p を含む円柱が存在する場合、点 p は針金パーツの内側にあると判定する。

判定の付加情報として、点 p を含んでいると判断された円柱 c_k の最も k の若い値を判定位置 i_{hit} として記録する。

移動

人が物を手に持って動かす際には、物の回転移動と平行移動は同時に区別なく行なわれる。ユーザにとって直感的な操作を実現するためにモデラでは回転移動と平行移動を区別せず、カーソルで掴んだパーツはそのカーソルの位置・角度の動きに同期し移動する。

移動操作は1つのカーソルでパーツを掴むことで行う。2つの別々のパーツを掴んでいる時には、それぞれのカーソル毎に個別の移動操作として処理する。

パーツの移動処理は具体的に、次の2段階に分けて行われる。

1. カーソル $Cursor_i$ に合わせて移動するパーツ集合 P_i の判断

カーソルが掴んでいるパーツと、そのパーツに繋がれているグループが移動の対象になる。グループは、掴んでいるパーツからパーツ間接続のデータを辿ることで取得する。

各カーソルが別グループのパーツを掴んでいる場合、各カーソルにたいして各グループ内のパーツすべてを P_i とする。結果、各カーソルは各グループ全体を移動させることになる。両カーソルが同一のグループ内の異なるパーツを掴んでいる場合には、グループ内のパーツをカーソルごとの2つのサブグループに分け、それぞれのサブグループを移動の対象にする。結果、各カーソルを動かすとグループは二つに分割されることになる。

2. 各パーツの移動

$Cursor_i$ の移動対象の各パーツ $p \in P_i$ の各頂点 $v \in Vertices$ を、新しい頂点 v' に式 3.1 を使い更新することで移動させる。

$$v' = T_{i,current} T_{i,previous}^{-1} v \quad (3.1)$$

粘土パーツの変形

粘土を指で押し込む引っ張りあげるといった動作を操作に取り入れることで、ユーザが直感的に粘土パーツの形状を変えられる様を目指す。

粘土パーツの変形操作は2つのカーソルで同一の粘土パーツを掴むことで行う。粘土パーツを掴んだ状態で各カーソルを動かすと、その動きに合わせてパーツが変形する。この時カーソルの掴んでいる部分に近いほど大きく変形するようにすることで、粘土らしい変形を実現した。図 3.18 は粘土パーツの変形時の頂点の更新イメージであり、図 3.19 は更新する各頂点の計算イメージである。粘土パーツの変形は、変形対象のパーツ p の各変形前の頂点 $v \in Vertices$ を、次に示す式を用いて新しい頂点 v' に更新することで行われる。式 3.2、3.3 の l_0 、 l_1 はそれぞれ、各カーソルから頂点への距離比の逆であり、カーソルから頂点に近いほどに大きくなる、0 から 1 の値である。この値を元に式 3.4~3.7 を使い、移動係数 w_0 、 w_1 を求める。移動係数は、各カーソルの移動による影響の度合いとなる係数で、図 3.20 に示すグラフのように、頂点からカーソルが遠い場合には小さく、近い場合には大きくなる。式 3.8 内の $T_{0,current} T_{0,previous}^{-1} v$ と $T_{1,current} T_{1,previous}^{-1} v$ は、各カーソルでパーツを移動した場合の頂点 v の位置（図 3.19）であり、各移動係数に応じてこれらの位置方向へ頂点 v が移動（図 3.19 の赤・緑のベクトル）した点を変更後の頂点 v' とする。

$$l_0 = \frac{|v - t_{1,previous}|}{|v - t_{0,previous}| + |v - t_{1,previous}|} \quad (3.2)$$

$$l_1 = \frac{|v - t_{0,previous}|}{|v - t_{0,previous}| + |v - t_{1,previous}|} \quad (3.3)$$

$$x_0 = l_0^2 \quad (3.4)$$

$$x_1 = l_1^2 \quad (3.5)$$

$$w_0 = -2x_0^3 + 3x_0^2 \quad (3.6)$$

$$w_1 = -2x_1^3 + 3x_1^2 \quad (3.7)$$

$$v' = v + w_0 \cdot (T_{0,current} T_{0,previous}^{-1} v - v) + w_1 \cdot (T_{1,current} T_{1,previous}^{-1} v - v) \quad (3.8)$$

針金パーツの変形

人が針金を手に持って曲げる際の、針金を両手で持って力を加える動作を操作に取り入れることで、直感的な針金パーツの形状を変えられるようにした。針金パーツの変形操作は、2

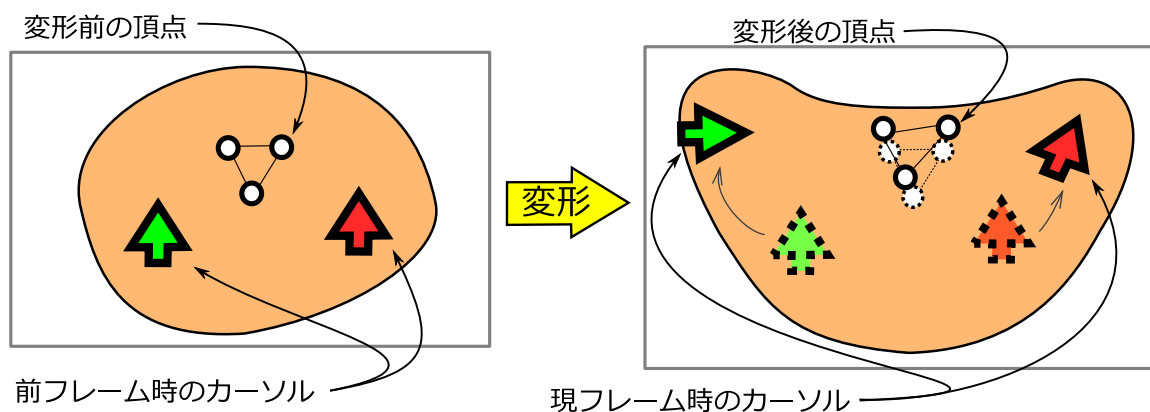


図 3.18: 粘土パーツを変形する際のモデルの更新イメージ

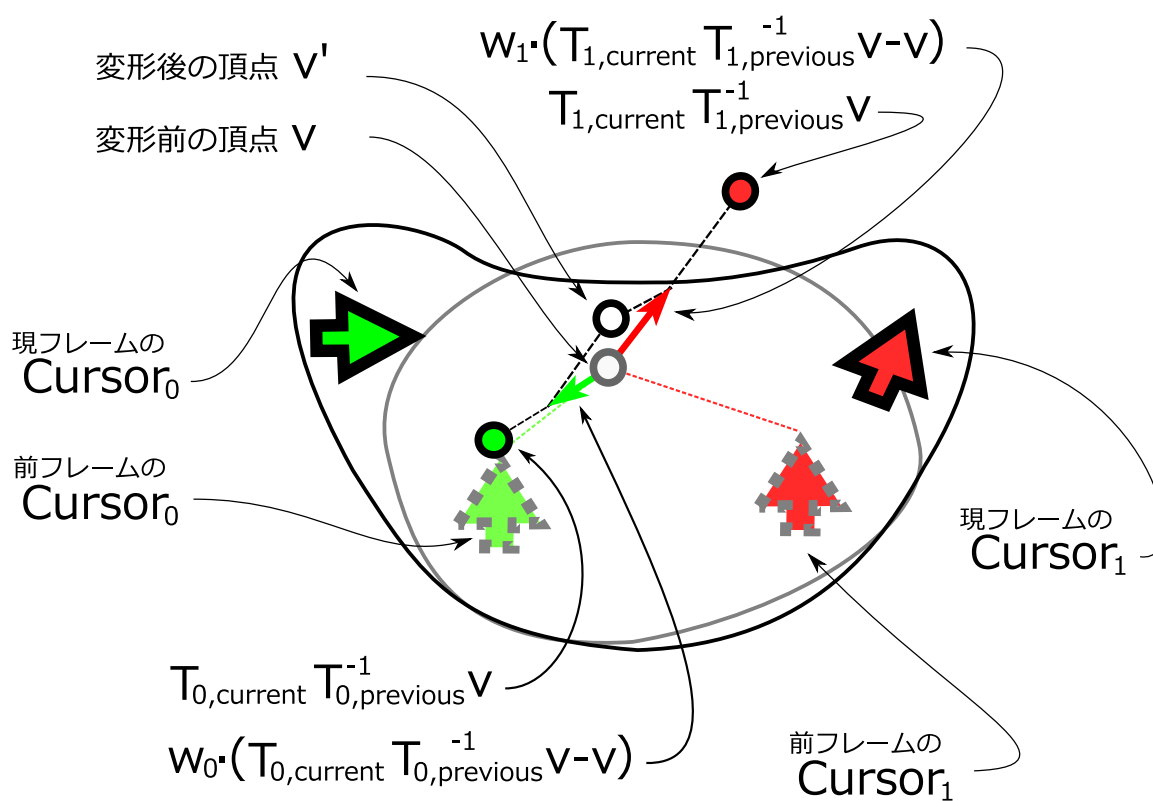


図 3.19: 更新頂点計算のイメージ

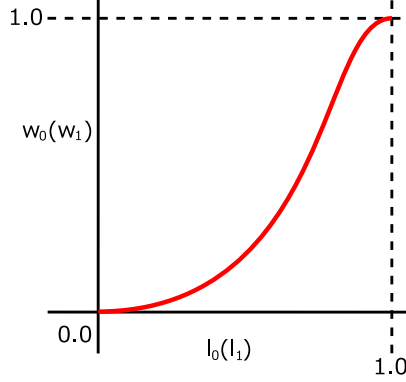


図 3.20: l_0 、 l_1 に対する移動係数 w_0 、 w_1 のグラフ

つのカーソルで同一の針金パーツを掴む事で行う。曲げる部分の変形にはベジェ曲線を利用した。

具体的に針金パーツの変形の手順を示す。まず以降の説明のため、各カーソル $Cursor_0$ 、 $Cursor_1$ が針金パーツを掴んでいる位置の頂点配列インデックスをそれぞれ $i_{grab,0}$ と $i_{grab,1}$ と表記し、 $first$ 、 $last$ を式 3.9、3.10 のように定義する。また、変形対象針金パーツの頂点配列 $Vertices$ の要素数を $n_{Vertices}$ として、式 3.11~3.13 のように、変形対象針金パーツの $Vertices$ を V_f と V_l 、 V_m 3 つに分割して表記する。図 3.21a はこの分割を示しており、青の楕円に囲まれた針金パーツの両端部分が V_f および V_l にあたり、赤の楕円で囲まれた中央部分が V_m にあたる。また V_f 、 V_l 、 V_m それぞれの要素数を n_{V_f} 、 n_{V_l} 、 n_{V_m} と表記する。

$$first = \begin{cases} 0 & (i_{grab,0} < i_{grab,1}) \\ 1 & (i_{grab,0} \geq i_{grab,1}) \end{cases} \quad (3.9)$$

$$last = 1 - first \quad (3.10)$$

$$V_f = \{v_0, \dots, v_{i_{grab,first}+1}\} \quad (3.11)$$

$$V_l = \{v_{i_{grab,last}}, \dots, v_{n_{Vertices}-1}\} \quad (3.12)$$

$$V_m = \begin{cases} \{v_{i_{grab,first}+2}, \dots, v_{i_{grab,last}-1}\} & (i_{grab,first} + 2 \leq i_{grab,last} - 1) \\ \{\} & (i_{grab,first} + 2 > i_{grab,last} - 1) \end{cases} \quad (3.13)$$

図 3.21 に示すのは針金パーツの変形イメージであり、図中の a~d は変形中の演算を図にしたものである。具体的には、針金パーツの変形操作の処理は次のように行われる。

1. 各カーソルが掴んでいる点より外側部分の変形

図 3.21b に示すように、図 3.21a で分けた両端部分の頂点配列 V_f 、 V_l をそれぞれカーソル $Cursor_{first}$ 、 $Cursor_{last}$ にしたがって移動させる。このときパーツ長さを調整するために、 V_f 中の $v_{i_{grab,first}+1}$ から V_l 中の $v_{i_{grab,last}}$ までの距離が、式 3.15 の d よりも

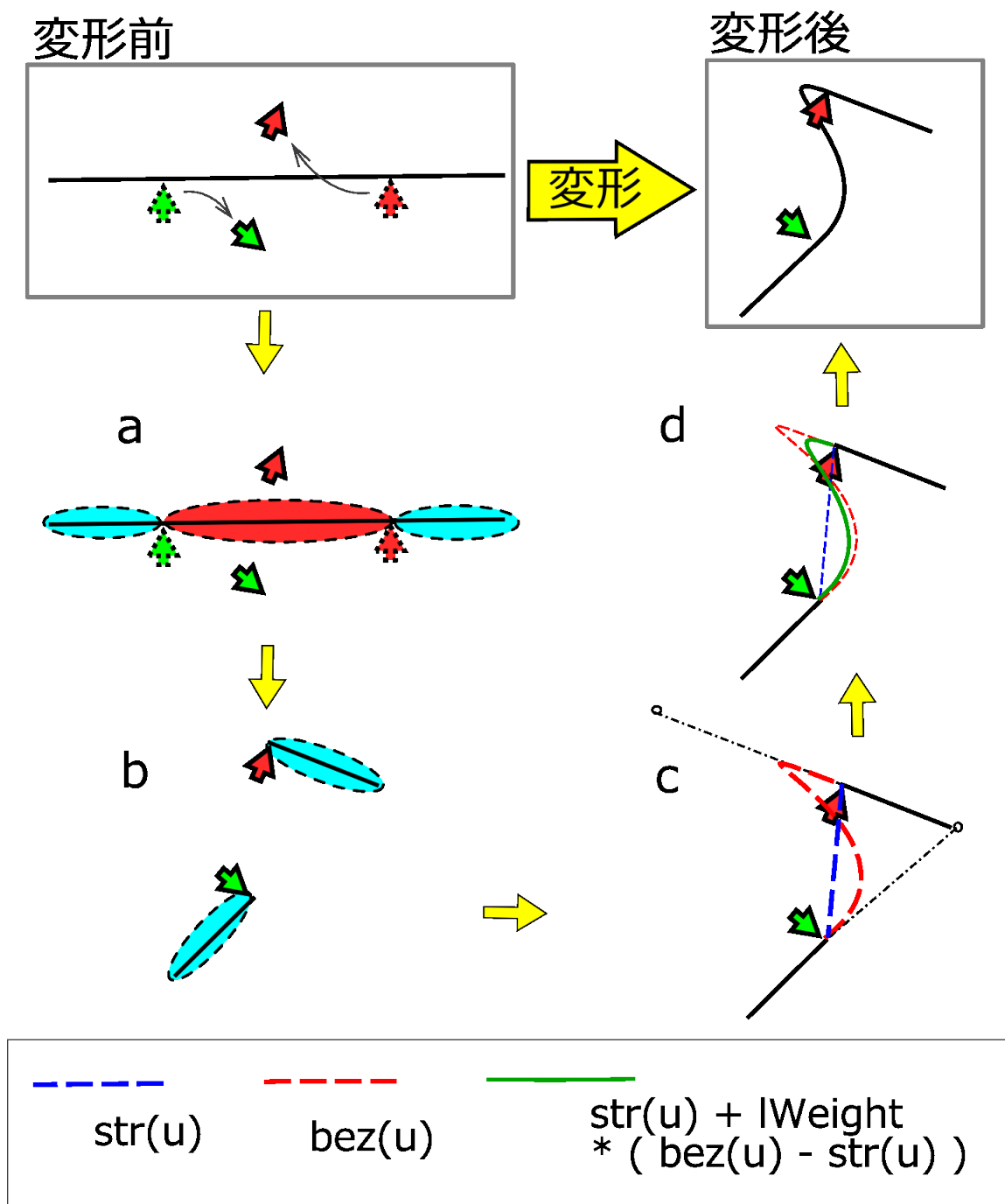


図 3.21: 針金パーツを変形する際のモデルの更新イメージ

大きくなる場合、その分 V_l を移動させる（式 3.17）。次に示す式 3.14 は変形前の頂点 $v_f \in V_f$ を変形後の頂点 v'_f に更新する。同様に、式 3.17 は $v_l \in V_l$ を v'_l に更新する。

$$v'_f = T_{first,current} T_{first,previous}^{-1} v_f \quad (3.14)$$

$$d_m = DesiredInterval \times (i_{grab,last} - i_{grab,first} + 1) \quad (3.15)$$

$$s_m = T_{last,current} T_{last,previous}^{-1} v_{i_{grab,last}} - T_{last,current} T_{last,previous}^{-1} v_{i_{grab,first}+1} \quad (3.16)$$

$$v'_l = \begin{cases} T_{last,current} T_{last,previous}^{-1} v_f & (d_m > |s_m|) \\ T_{last,current} T_{last,previous}^{-1} v_f + \frac{d_m - |s_m|}{|s_m|} s_m & (d_m \leq |s_m|) \end{cases} \quad (3.17)$$

2. 各カーソルが掴んでいる点より内側部分の変形

図 3.21c に示すとおり、まず $v_{i_{grab,first}+1}$ から $v_{i_{grab,last}}$ へのベジエ曲線（図 3.21c、d 中の赤の破線 $bez(u)$ ）を計算する。このベジエ曲線のコントロールポイントは端点（ $v_{i_{grab,first}+1}$ 、 $v_{i_{grab,last}}$ ）と、式 3.18～3.22 によって求められる 2 点 v_{conf} 、 v_{conl} の 4 点を与える（ $v_{i_{grab,first}+1}$ 、 v_{conf} 、 v_{conl} 、 $v_{i_{grab,last}}$ の順）。式 3.23 はこのベジエ曲線を示す。さらに $v_{i_{grab,first}+1}$ から $v_{i_{grab,last}}$ の線分 $str(u)$ （式 3.24）を計算し、 V_m の新しい値は式 3.25 によって求める（ $0 \leq k < n_{V_m}$ ）（図 3.21e 中の緑の実線）。

$$l_{mid} = |v_{i_{grab,first}+1} - v_{i_{grab,last}}| \quad (3.18)$$

$$l_{fl} = \frac{|(v_{i_{grab,first}+1} - v_{i_{grab,first}}) \times (v_{i_{grab,last}} - v_{i_{grab,first}})|}{|v_{i_{grab,first}+1} - v_{i_{grab,first}}|} \quad (3.19)$$

$$l_{lf} = \frac{|(v_{i_{grab,last}} - v_{i_{grab,last}+1}) \times (v_{i_{grab,first}+1} - v_{i_{grab,last}+1})|}{|v_{i_{grab,last}} - v_{i_{grab,last}+1}|} \quad (3.20)$$

$$v_{conf} = v_{i_{grab,first}+1} + 0.5 l_{mid} (0.7 \frac{l_{fl}}{l_{fl} + l_{lf}} + 0.3) (v_{i_{grab,first}+1} - v_{i_{grab,first}}) \quad (3.21)$$

$$v_{conl} = v_{i_{grab,last}} + 0.5 l_{mid} (0.7 \frac{l_{lf}}{l_{fl} + l_{lf}} + 0.3) (v_{i_{grab,last}} - v_{i_{grab,last}+1}) \quad (3.22)$$

$$bez(u) = v_{i_{grab,first}+1} u^3 + v_{conf} u^2 (1-u) + v_{conl} u (1-u)^2 + v_{i_{grab,last}} (1-u)^3 \quad (3.23)$$

$$str(u) = v_{i_{grab,first}+1} u + v_{i_{grab,last}} (1-u) \quad (3.24)$$

$$v_{i_{grab,first}+2+k} = str(\frac{k}{n_{V_m} + 2}) + lWeight \cdot (bez(\frac{k}{n_{V_m} + 2}) - str(\frac{k}{n_{V_m} + 2})) \quad (3.25)$$

$lWeight$ の値がより大きな値になることでパーツが長くなる。そのため、 $lWeight$ の値はパーツの長さがより以前の長さに近づくように調整する。具体的には $lWeight$ に仮の値を当てて実際に式 3.25 によって求められた針金パーツの長さを確かめる。得られた長さが本来の針金パーツの長さより長ければ $lWeight$ の値を減らして、短ければ $lWeight$ の値を増やして再度計算を行う。この計算を、本来の針金パーツの長さに一定値以下まで近づくか、繰り返し回数が一定の上限回数に達するまで繰り返す。

3. グループの他のパーツを移動

変形対象の針金パーツがグループ化されている場合には、そのグループのパーツが接続位置に合わせて位置関係を保つように移動する必要がある。このためにまず、変形対象の針金パーツに直接接続されている粘土パーツ $C_{direct} = \{c_0, c_1, \dots\}$ 毎に、グループをサブグループ $G_{c_0}, G_{c_1}, \dots$ に分割する。図 3.22 はこのサブグループへの分割のイメージ図である。図 3.22 のように変形対象の針金パーツに直接接続していた粘土パーツと、その粘土パーツに接続している同じグループの他のパーツがそれぞれサブグループに分割される。グループ中のパーツから、接続距離が最短になる C_{direct} 中の粘土パーツ c_i を 1 つ探し、そのパーツを G_{c_i} に含める。ここでパーツ A からパーツ B への接続距離とは、あるパーツ A から別のパーツ B までに辿ったパーツ間の接続数を指す。例えばパーツ A とパーツ B が直接接続されている場合は 1 となる。

針金パーツ変形に対するグループの移動は、サブグループ G_{c_i} 毎に、 c_i の接続頂点に合わせて移動する形で行われる。この接続頂点は、 c_i の変形対象の針金パーツとの間の、パーツ間データに記録されているインデックス $ConnectionIndex$ で指定されているものである。図 3.23 は、変形された針金パーツに直接接続されている粘土パーツの移動イメージを示したものであり、粘土パーツが、その接続している針金パーツの接続頂点との位置・角度を保ったまま移動している。この移動は、接続している粘土パーツをその接続頂点を中心に回転させた後、接続頂点の移動にあわせ平行移動する。粘土パーツと針金パーツの接続頂点のインデックス $ConnectionIndex$ を $i_{connect}$ 、針金パーツの現フレームの変形前の頂点を $v_{wire,i} \in Vertices$ 、変形後の頂点を $v'_{wire,i} \in Vertices$ とすると、接続しているグループ内のパーツの頂点 $v \in Vertices$ は、新しい頂点 v' に式 3.37 で更新される。ここで式 3.26、3.27 の $v_{previous}$ 、 $v_{current}$ は、図 3.23 に示したベクトルであり、これを使い式 3.28～3.36 で求める行列 R は、 $v_{previous}$ と $v_{current}$ の 2 ベクトルの外積ベクトル u_{axis} を軸に、この 2 ベクトルのなす角度 θ 回転させる行列である。

$$v_{previous} = v_{wire,i_{connect}+1} - v_{wire,i_{connect}} \quad (3.26)$$

$$v_{current} = v'_{wire,i_{connect}+1} - v'_{wire,i_{connect}} \quad (3.27)$$

$$u_{previous} = \frac{v_{previous}}{|v_{previous}|} \quad (3.28)$$

$$u_{current} = \frac{v_{current}}{|v_{current}|} \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} u_{axis} &= [x_u, y_u, z_u]^T \\ &= u_{current} \times u_{previous} \end{aligned} \quad (3.30)$$

$$\sin\theta = |u_{axis}| \quad (3.31)$$

$$\cos\theta = u_{current} \cdot u_{previous} \quad (3.32)$$

$$R_0 = \begin{bmatrix} x_u x_u + \cos\theta(1 - x_u x_u) \\ x_u y_u - \cos\theta x_u y_u + \sin\theta z_u \\ x_u z_u - \cos\theta x_u z_u - \sin\theta y_u \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} y_u x_u - \cos\theta y_u x_u - \sin\theta z_u \\ y_u y_u + \cos\theta(1 - y_u y_u) \\ y_u z_u - \cos\theta y_u z_u + \sin\theta x_u \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} z_u x_u - \cos\theta z_u x_u + \sin\theta y_u \\ z_u y_u - \cos\theta z_u y_u - \sin\theta x_u \\ z_u z_u + \cos\theta(1 - z_u z_u) \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

$$R = [R_0, R_1, R_2] \quad (3.36)$$

$$v' = R(v - v_{previous}) + v_{current} \quad (3.37)$$

グループ化・解除

両方のカーソルがそれぞれパーツを掴んでいる状態から、一方のカーソルの状態が Grab にもう一方の状態が Release になった時、それまで変形・移動していた針金パーツ・粘土パーツ間の接続関係を再構成する。針金パーツ・粘土パーツ間で衝突判定を行い、衝突のあるパーツ間を接続関係にあるとし、パーツ間接続のデータを記録する。

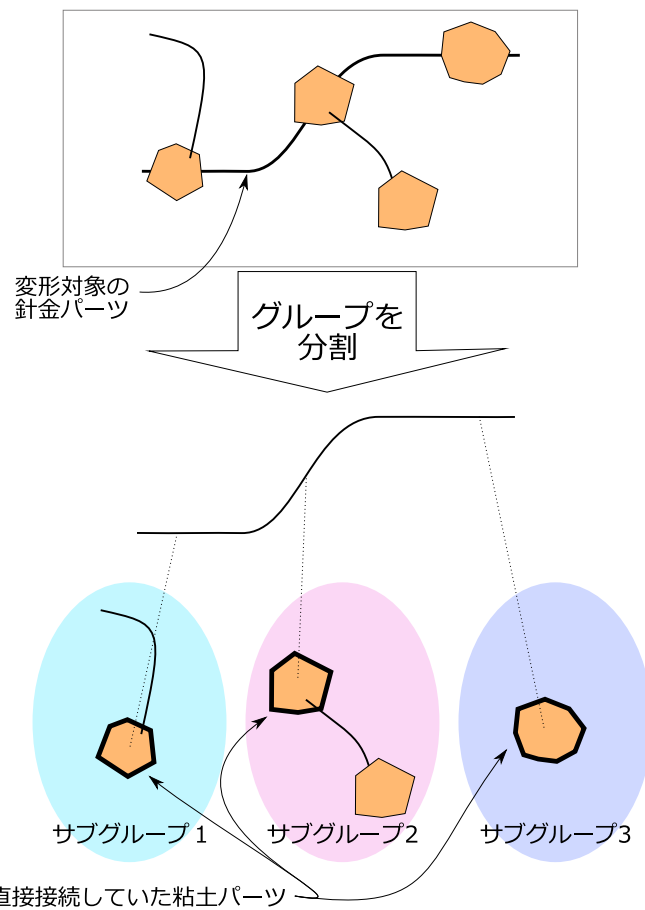


図 3.22: 針金パーツの変形時のグループの分割イメージ

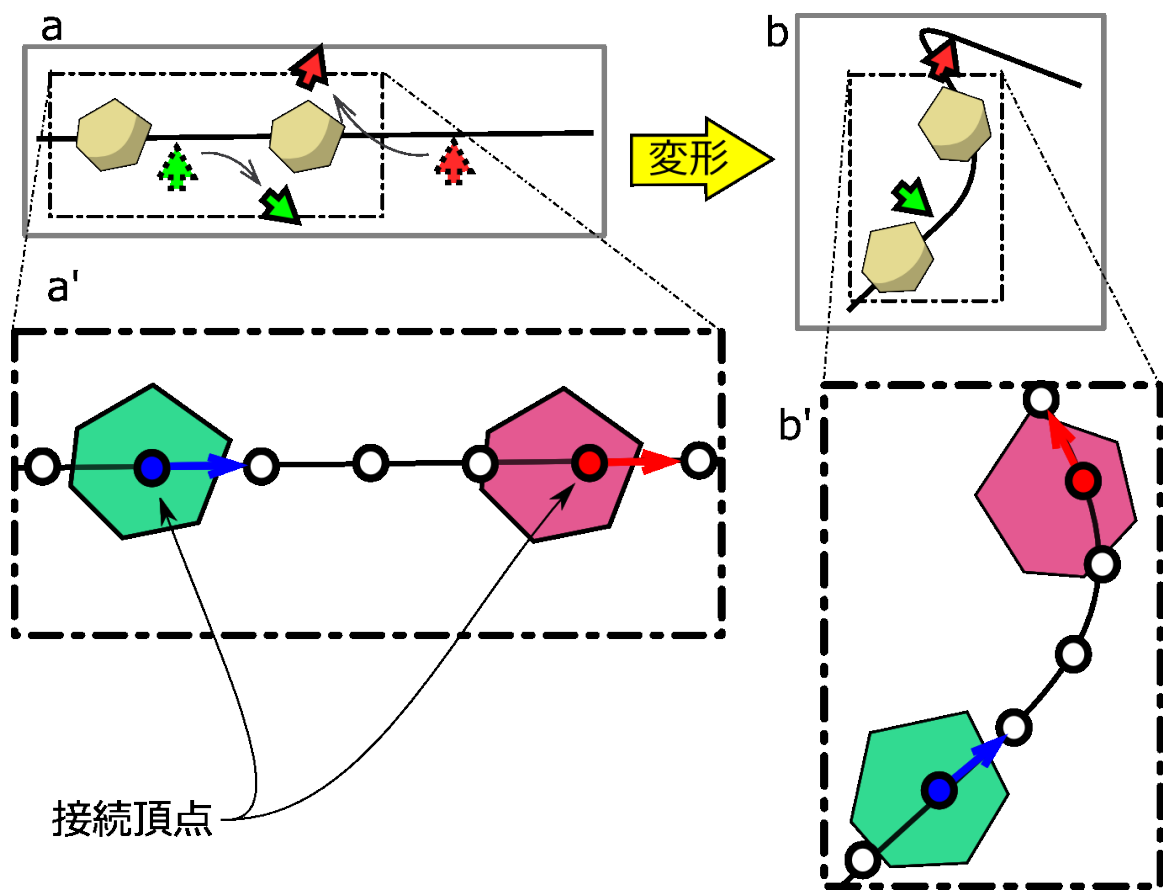


図 3.23: 針金パーツの変形にともなうグループの移動イメージ

第4章 関連研究

素早く簡潔な三次元形状の作成手法としては、五十嵐らの Teddy[3] や Zeleznik らの Sketch[4] のようなスケッチベースの手法が研究されている。これらではペン入力で平面上に描かれたストロークを元に、システムがそれを輪郭とする三次元形状を推測し、モデルを構成する。これらスケッチベースの手法と比べ、本研究は両手を使って変形・組み合わせ操作が直接的に行える。

粘土細工を模倣したモデリングに関する研究として、VirtualClay[2] などがある。VirtualClay では触覚インタフェースを用いて、触覚をもつ仮想粘土の変形操作を実現している。

また三次元的な両手操作による 3 次元形状の空間歪曲による変形の研究として、Llamas らの Twister[6] と Bender[7] がある。Twister は、両手に持った 2 つの 6DoF の磁気トラッカーを使い、三次元形状の表面を掴んで捻る、引っ張る等の変形を空間歪曲によって可能にしている。また Bender では、両手に持った 2 つの 6DoF の磁気トラッカーによって操る仮想リボンを使い、同じく三次元形状の表面の空間歪曲による変形を可能にしている。これら 2 つは両手によるサーフェイスの直感的な変形操作を実現している。

Schkolne らの SurfaceDrawing[8] は、デザイナーやアーティストの制作作業における初期のデザインを支援することを目的として、手の動きやタンジブルな道具を用いた有機的な三次元形状の素早い作成と操作を可能にしている。SurfaceDrawing では三次元形状の作成には手のひらで面を描き、 tong を手にして面をつまむように移動や回転操作等を行い、複数の面によって三次元形状を形作る。

本研究では、“粘土と針金を変形し、組み合わせる ”といった誰もが経験のある造形手法を両手を使った操作に割り当てることで、ユーザが直感的にかつ迅速にモデルを作成することを目指した。

第5章 今後の課題

今後の課題として、以下のものがあげられる。

- 各パーツの変形操作の改良

本研究では2つのカーソルを用いたパーツの変形操作を設計・実装した。しかし、よりユーザの思い通りの変形操作が行えるように改良が可能である。

例えば、現在の粘土パーツは変形操作された時に体積を保たないが、変形時に体積を保つようにする。すると、モデラの粘土パーツ変形操作は実際の粘土での変形操作に近づき、より直感的なものになると考える。

ほかに、入力装置のボタンをアナログボタンに替え、その上で、例えばアナログボタンを押す強さを針金パーツ変形時に必要となるベジェ曲線のコントロールポイントの計算に使うようにする。強くボタンを押すほどにそのカーソル側のコントロールポイントをベジェ曲線の端点に近づけるようにすると、力をかけた側の手元で針金パーツを強く曲げるといった操作が可能になり、これにより針金パーツを、ユーザが想定する形に変形しやすくなるものと考ええる。

- パーツのグループ化とグループの分割

本研究ではパーツのグループ化・解除操作を設計・実装した。パーツのグループ化とその解除が可能な点は本研究のモデラの重要な点である。このグループの解除操作は、そのグループ内の別個のパーツを掴み移動させることによって、その2つパーツを中心にグループを2つに分割することで行われるが、時にこのグループの分割が不自然に感じられ、ユーザが思ったように分割を行えないことがある。ユーザがグループをどのように分割したいかを検討し、より望ましい分割方法を実装することで、モデラの操作をより自然に感じられるものにできると考える。

- 各パーツ生成・削除

第2章で述べたラフデザインモデラの設計の中で、パーツの生成と削除に関しては未実装の部分がある。現在は入力装置以外に備えられたボタン（キーボード）の1入力に応じて、各パーツが画面中央に1つ生成される形に仮実装されている。そのため、パーツの生成時に入力装置を手放さねばならず、ユーザの制作活動を阻害するものとなっている。

第6章 結論

本研究では三次元モデルのラフデザインを支援するモデラを設計し、実装を行った。実装したモデラが扱うモデルの構成要素は“粘土と針金”に模したもので、ユーザはこの構成要素を両手による直感的な操作で配置し、変形し、組み合わせることができる。実装したモデラの操作は直感的で簡潔なものであるため、三次元モデルのラフデザインを支援することができる。

謝辞

本論文を執筆するにあたり、指導教員である田中二郎先生をはじめ、志築文太郎先生、三末和男先生、高橋伸先生には多大なるご迷惑をおかけしたにもかかわらず、丁寧なご指導と暖かな励ましを頂きました。心より感謝し、厚く御礼を申し上げます。また、貴重なご意見と多くのご支援を頂いた田中研究室の皆様に感謝します。最後にこれまで自分を支えてくれた両親や家族、友人達にも深く感謝し、御礼申し上げます。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] Richard C. Davis, Brien Colwell and James A. Landay. K-Sketch: A “ Kinetic ” Sketch Pad for Novice Animators. Proceedings of the twenty-sixth annual SIGCHI conference on Human factors in computing systems, 2008. pp. 413-422.
- [2] Kevin T. McDonnell, Hong Qin and Robert A. Wlodarczyk. Virtual clay: a real-time system with haptic toolkits. Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics, 2001. pp. 179-190.
- [3] Takeo Igarashi, Satoshi Matsuoka and Hidehiko Tanaka. Teddy: a sketching interface for 3D freeform design. Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 1999. pp. 409-416.
- [4] Robert C. Zeleznik, Kenneth P. Herndon and John F. Hughes. SKETCH: an interface for sketching 3D scenes. Proceedings of ACM SIGGRAPH 1996, 1996. pp. 163-170.
- [5] Kato H and Billinghurst M. Marker Tracking and HMD Calibration for a video-based Augmented Reality Conferencing System. Proceedings of the 2nd International Workshop on Augmented Reality, 1999. pp. 85-94.
- [6] Ignacio Llamas , Byungmoon Kim, Joshua Gargus, Jarek Rossignac and Chris D. Shaw. Twister: A Space-Warp Operator for the Two-Handed Editing of 3D Shape. ACM Transactions on Graphics , v.22 n.3, 2003. pp. 663-668
- [7] Ignacio Llamas, Alexander Powell, Jarek Rossignac and Chris D. Shaw. Bender: A Virtual Ribbon for Deframing 3D Shapes in Biomedical and Styling Applications. Proceedings of the 2005 ACM symposium on Solid and physical modeling, 2005. pp. 89-13.
- [8] Steven Schkolne, Michael Pruett and Peter Schroder. Surface Drawing: Creating Organic 3D Shapes with the Hand and Tangible Tools. Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, 2001. pp. 261-268.