

2008年度 卒業論文

風船の物理特性を考慮した
バルーンモデリングの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 M0105170
小坂 友里

2008年度 卒業論文概要

論文題目

風船の物理特性を考慮した
バルーンモデリングの制作支援に関する研究

メディア学部

学籍番号：M0105170

氏名

小坂 友里

指導
教員

渡辺 大地講師

キーワード

バルーンモデリング、制作支援、風船、
形状変形、粒子法、ばねモデル

近年、バルーンアート的一种であるバルーンモデリングの技術が向上してきた。しかし、バルーンモデリングにおいてオリジナル作品の設計は難しいものとなっている。バルーンでの試作に先立ってイメージ図を作成するが、これはバルーンの物理的な特性など考慮しておらず、イメージ図通りの形状が出来るかは実物を変形するまでわからない。そのあいまいな状態で試作を行うと、途中で割れるなど失敗するケースが多い。またバルーンは一度変形させると再利用が難しく、試行錯誤するための耐久性に問題がある。

そこでイメージ図作成とバルーンでの試作の間に、3DCGでバルーンの変形をシミュレーションするツールが有効である。試作前に具体的な制作過程および変形をシミュレーションすることで失敗のリスクを軽減させ、試行錯誤する時間や試作にかかるバルーンのコストを削減することが出来る。

本研究では変形シミュレーションを行うための基盤である物理的変形を考慮した変形モデルを作ることを目的とする。具体的にはバルーンのゴム膜の弾性表現をばねモデルをつかって表現し、内部の空気を粒子法を用いて表現した。さらに提案した変形モデルに対し、バルーンモデリングにおける基本的単位であるバブルを作る操作を行い、その効果を検証した。

目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	論文構成	4
第2章	バルーンモデリングについて	5
2.1	バルーンアートとは	5
2.2	バルーンモデリング	6
2.2.1	ペンシルバルーンとは	6
2.2.2	変形の種類	7
2.2.3	新作開発のフローと問題点	8
第3章	物理特性を考慮した変形手法	12
3.1	ゴム膜の表現	12
3.2	内部の空気の表現	14
3.3	ゴム膜と空気粒子の相互作用	16
3.4	空気漏れへの対応	19
3.5	ゴム膜同士の接触	20
3.6	バブルによるクラスタ化	21
3.7	各要素に発生する力と計算手順	21
3.8	GPGPUによる高速化	25
第4章	動作検証	27
4.1	実装	27
4.2	実行結果	28
4.2.1	空気の拡散	29
4.2.2	外力を加える	30
4.2.3	バブルを作る	31
4.2.4	曲げる	34
4.3	検証	35
第5章	まとめ	36

謝辭	38
參考文獻	39

目 次

2.1	バルーンモデリングの作例	6
2.2	主な変形操作の種類	7
2.3	バブルサイズ	8
2.4	犬の作り方	9
2.5	バルーンモデリングの設計工程	10
3.1	ばねモデルの力のかかる方向	13
3.2	ばねモデルによるバルーンオブジェクトのゴム膜	14
3.3	粒子の影響範囲と他粒子とのつながり	15
3.4	粒子の斥力	16
3.5	オフセット領域	17
3.6	内外判定	20
3.7	提案手法のイメージ図	22
3.8	計算の流れ	23
4.1	空気の拡散	29
4.2	外力を加える	30
4.3	バブルを作る	31
4.4	バブルを複数作る	32
4.5	ゴム膜の変形に伴う空気粒子の移動	33
4.6	曲げる	34

第 1 章

序論

1.1 はじめに

近年、風船を使った飾りつけ (バルーンアート) の効果の高さが認識されてきた。それに伴い、細長いゴム風船を曲げる・ひねるなど変形し造成物をつくるバルーンモデリングの技術も向上してきた。しかし、初心者にとってオリジナル作品の設計は難しいものとなっている。バルーンモデリングで作品を設計する際には、バルーンでの試作に先立ってイメージ図を作成する。しかし、これはバルーンの物理的な特性など考慮しておらず、イメージ図通りの形状が出来るかは実物を変形するまでわからない。そのあいまいな状態で試作を行うと、途中でバルーンが割れるなど失敗するケースが多い。またバルーンは一度変形させると再利用が難しく、試行錯誤するための耐久性に問題がある。

そこで本研究では、物理的特性を考慮したバルーンモデリングの制作支援ツールが有効であると仮説を立てた。想定するツールはオリジナルの作品を設計したい人を対象とし、バルーン型の 3D モデルを変形し、バルーンモデリングの制作過程をシミュレーションすることができるものとする。オリジナル作品の設計において実際のバルーンでの試作前に、具体的な変形シミュレーションを行うことで失敗のリスクの軽減を実現する。失敗のリスクが減ることで、試行錯誤する時間や試作にかかるバルーンのコストなどを大幅に削減することが可能となる。よりリアリティのあるシミュレーションを行うために、変形は物理特性を考慮するこ

とが必要である。本研究では制作支援ツールの基盤として、バルーンの物理的変形を考慮した変形モデルを提案する。なお多くの物理特性のうち、考慮するのはバルーンモデリングの基本単位であるバブルを作るために必要な要素のみに限定する。

3DCG はゲームや映画などの映像コンテンツだけでなく、物理的なオブジェクトをデザインするためのツールとしても発展してきた。近年、設計する対象物の物理特性を反映した、対象物に関する専門技術や知識のない人向けの設計支援システムの研究が盛んである。たとえばペーパークラフトをデザインするツール [1] や、ぬいぐるみをデザインするツール [2] などが挙げられる。

コンピュータを使用して製品の設計や製図を行う代表的なシステムとして CAD (Computer Aided Design, コンピュータ支援設計システム) がある。CAD は汎用的であるが、素材の特性までは解析できない。バルーンは形状変形にゴム膜とバルーン内部の空気が密接に関係しており、作品を設計する上でそれらを考慮する必要がある。また物理現象を予測し、材質の解析を行う CAE (Computer Aided Engineering, 計算機支援工学) は、解析結果の精度に重きを置いており、対話操作が難しい。そのため対話操作が必要となる本研究では、解析結果の精度よりもインタラクティブ性が重要となる。このため、汎用 CAE システムは適していない。

3DCG とバルーンモデリングに関する既存研究として仮想風船モデリングシステム「ばるるーん」 [3] がある。これは小学生を対象とし、3次元モデリングや CAD の初歩を学ぶソフトである。このシステムは子供に楽しみながら学んでもらうために、バルーンモデリングを題材にしている。このシステムは画面上の 3DCG のバルーンに対し、バルーンモデリングでの基本的な変形操作を行える。そしてユーザーが変形した結果をサンプルデータと比較し、その出来をアニメーションなどを用いて評価するものになっている。しかしこのシステムではバルーンの基本的な変形操作で実現していないものがあり、作れる形状に限界がある。さらにゴムの弾性解析や内圧による形状変形など物理的変形を考慮したシミュレーションは実現していない。そのためバブルの形状や、バルーン同士が接触する部分におい

て実物と大きく異なった変形となるため、オリジナル作品の設計支援には適していない。

本研究で考慮すべきバルーンの物理特性として、ゴム膜の弾性体と内部の空気の挙動がある。バルーンのものである天然ゴムは外力を加えて変形しても、力が無くなれば元の形に戻る弾性体である。弾性体をCGで表現する研究[4][5]はばねモデル[6]や有限要素法[7]など多く存在する。ばねモデルとは、質点同士の力学特性を基にしたシミュレーション手法[8]である。ばねモデルはオブジェクトを有限個の質点と、質点間にフックの式でばねを構成し、ばねによる相互作用力を計算することで弾性体の挙動を表現する。計算の安定性などいくつかの問題点はあるが、演算処理が比較的少なく、リアルタイム処理に適している。また数値解析手法の1つである有限要素法がCG分野にも応用されている。有限要素法は対象とする物体が持つ伸縮比などの物理特性の値を直接利用でき、精度の良いシミュレーションが可能となる。しかし多くの演算処理を必要とし、リアルタイム処理には不向きである。本研究では多くの変形を行うことを想定するため、変形の解析に時間のかかる有限要素法などの手法はユーザーにストレスを与え、インタラクティブ性を欠く。そこで弾性物体の特性をある程度近似し、リアルタイムで動作するばねモデルを利用する。

内部の空気や圧力を表現するモデルも研究されている。例えばモデルを圧力により膨張させ、バルーンのような挙動を表現する研究として、ばねモデルを改良したPSBモデル[9]がある。PSBモデルはばねモデルで構築した閉じたオブジェクトに対し、圧力に相当する力を内側から加えてモデルを膨張させている。しかしPSBモデルはパラメータの設定が難しく、形状が大きく変形して内部空気の分断が起きた場合にはパラメータを再設定しなければならない。空気等の流体の表現には粒子法[10][11]が提案されている。粒子法では物体を粒子の集合で表し、粒子の運動を計算することで物体の挙動を求める。本研究では粒子間の斥力を計算することで空気の非圧縮性を表現し、粒子数を一定に保つことで体積の保存を表現する。

また本手法では、空気粒子間の斥力計算など単純かつ大量の処理を行う必要がある。本研究ではユーザーの操作に対しインタラクティブ性が必要なため、高速化処理が必要となる。そのため一部の計算処理を GPGPU の技術を用いて高速化を行った。

1.2 論文構成

第 2 章ではバルーンモデリングの概要について述べる。第 3 章では考慮する物理特性とその表現モデルについて述べ、それらを用いた表現手法の提案と試作をする。さらに GPGPU による高速化についても述べる。第 4 章では実行結果と検証、第 5 章では今後の展望について述べる。

第 2 章

バルーンモデリングについて

この章ではバルーンモデリングの概要について述べる。ペンシルバルーンの物理特性や、変形操作の種類、作品設計のフローと問題点について説明する。

2.1 バルーンアートとは

バルーンアートとはバルーンを用いて造成物を作る行為である。バルーンアートはバルーンデコレーションとバルーンモデリングに分けられる。バルーンデコレーションとはゴム風船を複数個つなげて造成物をつくるものであり、イベント会場や結婚式場などの会場装飾に用いることが多い。バルーンモデリングとは細長いゴム風船を曲げる・ひねるなど変形させて造成物をつくるものであり、大道芸やイベント会場の客引き、趣味として親しまれている [12]。図 2.1 にバルーンモデリングの作例を示す。日本ではツイスト・バルーン、アート・バルーン、マジック・バルーン、ペンシル・バルーンとも呼ぶ。近年は結ぶ、膨らませるといった手指を使う簡単な動作や、色彩の豊かさから高齢者向けのリハビリテーションとしても利用されている [13]。本研究ではこのバルーンモデリングを研究対象とする。



図 2.1: バルーンモデリングの作例

2.2 バルーンモデリング

2.2.1 ペンシルバルーンとは

バルーンモデリングではペンシルバルーンという専用の細長いゴム風船を使用する。ペンシルバルーンにはいくつか種類があり、それを表すために「260」、「360」のような略号を用いる。略号の1桁目の数字が太さ、次の2桁の数字が長さを表す。例えば「260」は太さ2インチ(約5センチ)、長さ60インチ(約160センチ)であることを表す。多くのバルーンモデリング作品が260の規格を使う[14]ため、本研究でバルーンのサイズは260を想定する。

ペンシルバルーンは天然ゴムでできており、変形しやすいように伸縮性に富んでいる。天然ゴムは外力を加えて変形させても、力が無くなれば元の形に戻る弾性体である。ゴムは弾性率が弱く、よく伸びるため、ペンシルバルーンの体積は元の形状の125倍まで膨らむ[15]。またゴムは変形しても体積変化がきわめて少ないため、バルーンのゴム膜の体積は一定である。ゴムは強い力がかかるとその力が取り除かれても元の形状に戻らない塑性変形が起こる。また弾性限界と呼ばれる伸びる限界点があり、それを超えるとバルーンは割れる。しかし本研究では塑性変形およびバルーンが割れるという事象は扱わないものとする。

バルーンを膨らませるには口で息を吹き込むか、専用の空気ポンプを利用する。バルーンの口元を結んだ後はバルーンの一部を割るなど意図的に空気を抜かない

限り、内部の空気の量は一定に保たれる。実際のパルーンは数日経つとしぼんでしまうが、これは結び口やゴム分子の隙間から空気分子が漏れ出ているためである。作品を長持ちさせる為に、ウルトラハイフロートという糊のような液体であらかじめパルーンの内部をコーティングし、空気が外に出ないようにすることで作品を長持ちさせる方法もある。しかし短時間に漏れ出る空気は微量なため、パルーンモデリングを行う間は体積の減少を無視できる。

2.2.2 変形の種類

パルーンモデリングは任意の長さに膨らませたペンシルパルーンを、ひねったり曲げたりして形を作っていく。図 2.2 にパルーンモデリングにおける基本的な 4 種の変形操作を示す。これらの変形を組み合わせることで様々な形を作っていく。

1. 曲げる : パルーンに曲げクセをつける。
2. バブルを作る : パルーンをひねってソーセージ状のかたまりを作る。このかたまり (以下バブル) がパルーンモデリングにおける基本単位である。
3. ロックツイスト : 2 つ以上のバブルを輪状にひねり合わせる。
4. ループツイスト : 1 つのバブルの始点と終点をひねり合わせる。

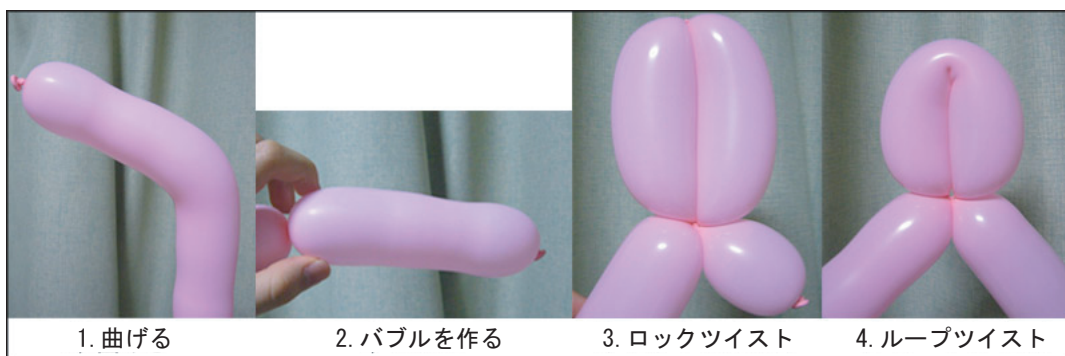


図 2.2: 主な変形操作の種類

バブルはその長さに応じて膨らみ方が異なる。これはゴムの弾性力により表面積が最も小さくなる球形に近づくように膨らむためである。図 2.3 は右から 5 センチ, 3 センチ, 9 センチにひねったバブルである。



図 2.3: バブルサイズ

通常バブルはバルーンの結び目側から作っていく。これはひねった際に空気が先端部に移動できるようにするためである。先端に伸びしろを残しておくことで空気の逃げ場を作り、バルーンを割らずに制作することができる [16]。1 箇所ひねると約 1 センチ伸びるので、ねじる回数が多い作品ほど先端部を多く残す必要がある。このようにバルーンモデリングでの設計においては膨らませる空気の量と同時にこの伸びしろも考慮する必要がある。本研究では空気の量のみを対象とし、伸びしろ部分は考慮しない。具体的にはバルーンを伸びしろなく全て膨らませたものから少量の空気を抜いた状態で変形を行うものとする。

1 本のバルーンで作品を作っていく場合、バブルが数珠つなぎになるように変形をしていく。その際、単にバブルを作っただけでは手を離すと元に戻ってしまう。バブルを固定する場合はロックツイストやループツイストを行い、ゴム膜同士の摩擦によって戻らないようにする。

2.2.3 新作開発のフローと問題点

バルーンモデリングは変形手順やバブルの長さなどが書かれた図や写真入りの解説書を元に作っていく。

以下に、代表的な作品である「犬」の作り方の手順を示す。図 2.4 は手順を図示した物である。

1. 10 センチ残して膨らませる
2. しばった口元から 10 センチのバブルを 3 つ作る
3. 星印の所で折ってロックツイストする
4. 首 (7 センチ) と前足 (12 センチ 2 つ) をひねり、星印の所で折ってロックツイストする
5. 胴 (15 センチ) と後足 (12 センチ 2 つ) をひねり、星印の所で折ってロックツイストする
6. 完成

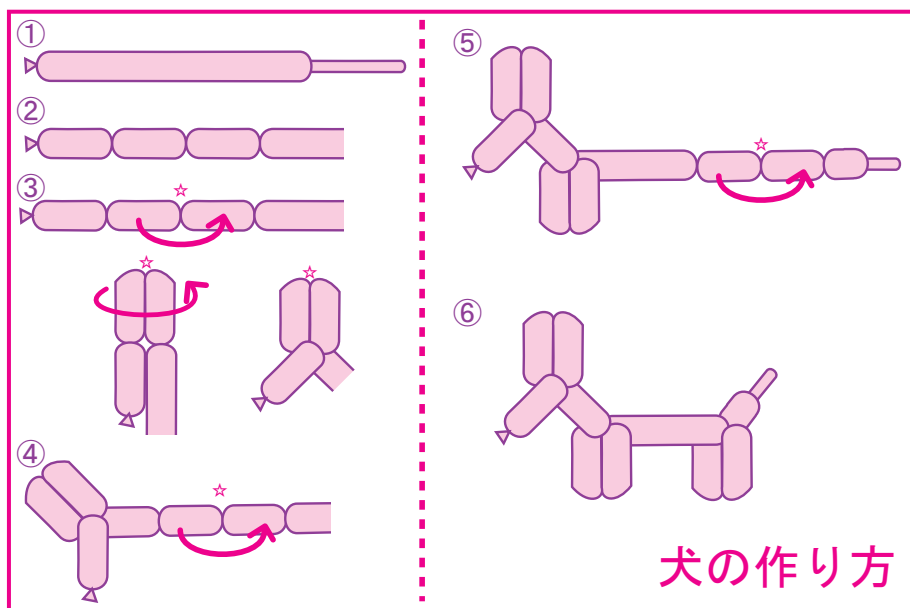


図 2.4: 犬の作り方

バルーンモデリングは解説書を見ながらひねるのは容易だが、オリジナルの作品を設計するのは初心者には難しい。オリジナルの作品を設計・作成するために

は、作る対象物の資料から簡単なスケッチを起こし、さらにそれをバルーンに置き換えたイメージ図と、変形操作が一筆書きになるような作業手順を考える。図 2.5 に作品の設計工程を示す。

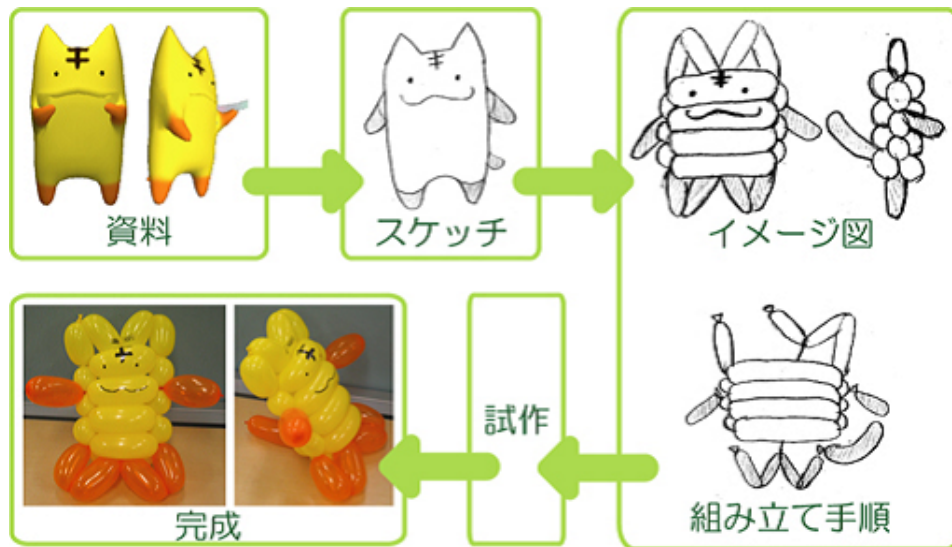


図 2.5: バルーンモデリングの設計工程

しかし出来上がりの形状を想像しながら、適切なバブルの長さや変形手順を考えることは初心者には難しい。大道芸人や制作経験の豊富な人が、試行錯誤を重ねてオリジナル作品を設計しているのが現状である。さらにイメージ図はバルーンの物理的な変形を考慮しながら書いているわけではなく、イメージ図通りの形状が出来るかは実物を変形するまでわからない。またバルーンはバブルをつなげたまま変形させる為、変形操作の順番は一筆書きが原則となる。イメージ図でバブルに置き換えたとしても、一筆書きでできるか検討する必要がある。このように完成までにはイメージ図作成と試作を繰り返さず試行錯誤が必要になる。しかしペンシルバルーンは一度変形させると曲げクセがついたり、割れやすくなり、試行錯誤を行うには耐久性に問題がある。バルーンをふくらませる量やバブルの長さの検討など微調整もきかないため、失敗したらやり直さなければならず、多くの時間とペンシルバルーンが必要となる。

そこでイメージ図作成とバルーンでの試作の間に、3DCG でバルーンの変形を

シミュレーションすることが有効であると考え。試作前に具体的な制作過程および変形をシミュレーションすることで失敗のリスクを軽減させ、試行錯誤する時間や試作にかかるバルーンのコストを削減することが出来るためである。より具体的な変形シミュレーションを実現するためには、バルーンの物理的変形を考慮する必要がある。そこで本研究では空気やゴム膜の物理的変形を考慮したバルーンの変形モデルを提案する。第3章でその考慮すべき物理特性とその表現手法を述べる。

第 3 章

物理特性を考慮した変形手法

ここでは弾性体と空気の解析手法を示し、内部空気を考慮したオブジェクトの変形モデルを提案する。ゴム膜の表現はばねモデルを、空気の表現は粒子法を参考にし、各要素の相互作用力を計算することでバルーンの物理特性を表現する。

3.1 ゴム膜の表現

本研究で用いるゴム膜モデルは 4 角形面の集合で構成した。基本的にこの 4 角形面に対して処理を行うが、干渉計算を行う場合は 4 角形面に対角線を引き、2 枚の 3 角形面として処理を行う場合もある。本章ではゴム膜モデルを 4 角形面集合と 3 角形面集合のどちらとして扱うかは、節の始めに明示する。

ゴム膜の弾性表現についてはばねモデルにより表現する。ここではゴム膜モデルは 4 角形面集合として扱う。ばねモデル [17][18] とは、質点同士の力学特性を基にしたシミュレーション手法である。ばねモデルのオブジェクトは有限個の質点と、質点間にフックの式に減衰を加えた式 (3.1) でばねを構成する。

$$\mathbf{F} = \{k_s(|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2| - l_0) + k_d((\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2) \cdot \mathbf{n}_{1 \rightarrow 2})\} \cdot \mathbf{n}_{1 \rightarrow 2} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{n}_{1 \rightarrow 2} = \frac{\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2}{|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2|} \quad (3.2)$$

ここで \mathbf{F} は質点にかかる力、 k_s はばね定数、 \mathbf{x}_1 と \mathbf{x}_2 はばねの両端点の位置、 l_0 は初期状態の両端点間の距離（自然長）である。このときの \mathbf{x}_1 は \mathbf{x}_2 に接続して

いるとする。一般に差分法により離散時間における質点の位置を計算することで、ある質点に外力を加えて動かすと質点同士が影響しあい、弾性物体の挙動を表現する。質点間の距離が自然長 l_0 より長ければ、それに比例した力が質点を引き合わせる方向にかかり、逆に自然長 l_0 より短ければ離れる方向に力がかかる。図 3.1 に質点間の距離によってばねモデルの力のかかる方向が変わる様子を示す。

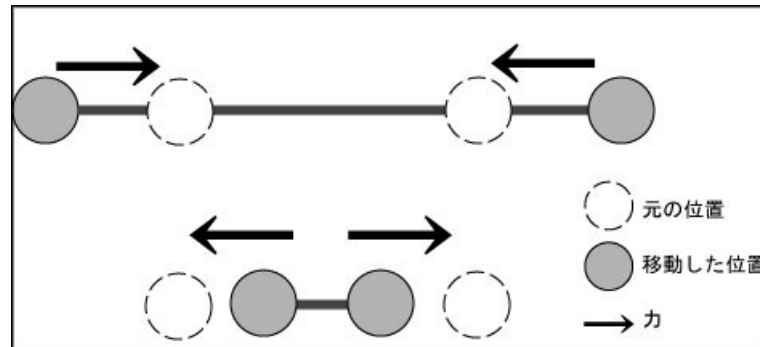


図 3.1: ばねモデルの力のかかる方向

さらに k_d はばねの減衰係数であり、 v_1 、 v_2 はばねの両端点の速度、 $\mathbf{n}_{1 \rightarrow 2}$ は x_1 から x_2 に向かう方向ベクトルである。この項はばねの振動を緩和し、収束させるダンパの機能を持ち、これを加えることにより変形挙動に粘性を与える。また稜線上のばねの長さを変更することによって、様々な形状に対応することが可能である。しかしばねモデルは対象物体の物理特性の値を直接利用することはできず、近似的な表現となる。

ばねモデルには変形の過渡特性に問題がある。任意のばねに外力が与えられた場合、そのばねに接続している質点に順々に力が伝播する。これを変形の過渡特性という。そのため強すぎる外力が急激に加わると、ばねモデルの構造が局所的に破壊されてしまう。この問題を解決するために、本研究においては外力に制限をかけることで過度の力の発生を防ぐ。さらにばねの伸長に制限をかけることで局所的な破壊を防ぐ。

図 3.2 はバルーンオブジェクトのゴム膜部のイメージ図である。ペンシルバルーンの形状をしたオブジェクトの頂点間にばねを構築し、式 (3.1) によって頂点間の

距離に応じた力を各頂点に付与する。このオブジェクトは閉じた形状とし、稜線の長さができるだけ均一になるようにする。

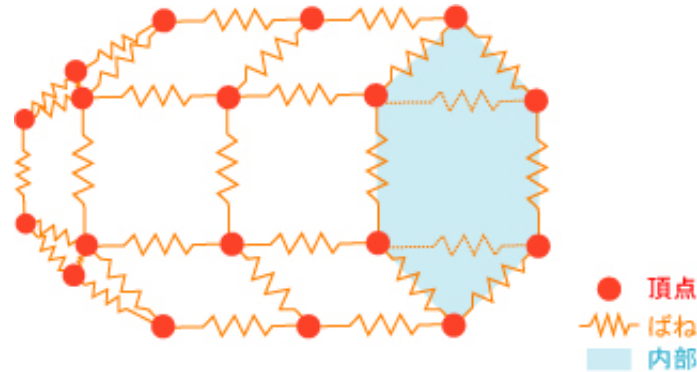


図 3.2: ばねモデルによるバルーンオブジェクトのゴム膜

ばねモデルを用いて複雑な挙動を表現するためには、多くの質点およびばねを用いてオブジェクトを表現する必要がある。しかし、ばねの数の増加に比例して計算量が増加してしまうという問題もある。本研究ではオブジェクト内部には3.2節に説明する空気粒子を詰め込むため、内部には支えとなるばねは構築しない。

3.2 内部の空気の表現

本研究では粒子法の考え方を参考に空気を粒子の集合として扱い、その粒子量を一定に保つことで内部空気の体積の保存を表現する。粒子法では物体を粒子の集合で表す。そして各粒子に変数を配置し、物理法則をそれらの変数の関係式に離散化し、粒子の運動を計算することで物体の挙動を求める [11]。粒子法では、ある粒子から一定の距離（影響範囲）より近い他の粒子すべてとの間で関係式を作るため、粒子間のつながりは自動的に計算される。図 3.3 で粒子の影響範囲と他粒子とのつながりの様子を示す。計算の途中で粒子間の距離が離れば自動的につながりは消え、粒子間の距離が短くなれば自動的につながりが発生する。そのため粒子法では粒子間のつながりをあらかじめ定義する必要はなく、大きな形状変形の計算も容易となる。

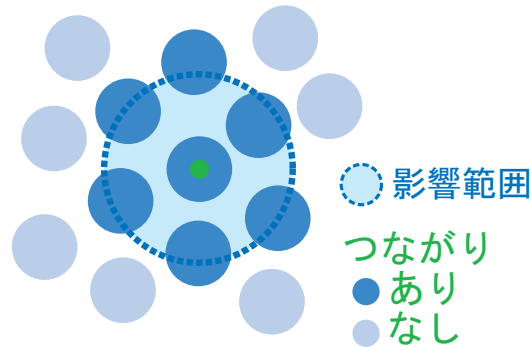


図 3.3: 粒子の影響範囲と他粒子とのつながり

粒子法の 1 つである MPS 法 (Moving Particle Semi-implicit Method)[11] は、水などの非圧縮性の流体を半陰的なアルゴリズムで解く手法である。空気等の流体は主な性質として粘性と圧縮性を持つ。粘性とは流体に働く摩擦力によって流体の運動をできるだけ均一にしようとする性質のことであり、圧縮性とは流体の密度が変化する性質のことである。流体は流速が音速に比べて十分遅い場合は、非圧縮性の流れとして扱ってよい [10]。バルーン内の空気は低流速のため、空気の圧縮性は無視できる。また空気の粘性も非常に小さく無視して構わない。よって本研究では空気は、非粘性・非圧縮性の流体であるものとする。

粘性は無視するため、粒子の運動は非圧縮性によるもののみを考える。一般的に非圧縮性の計算をする場合はまず圧力を求め、そこから粒子間の斥力を求めるが、この計算は時間がかかるためリアルタイム性を欠く。よって本手法では粒子が動く空間の広さを、あらかじめゴム膜の内部に制限して高速化を図り、粒子間に単純な斥力を働かせることで非圧縮性を表現する。

粒子に対して重み関数を定義し、粒子を中心に重み関数の有効範囲を示す影響範囲球も定義する [19]。具体的な重み関数 $w(r)$ の式 (3.3) は次のようなものである。

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e}{r} - 1 & (r \leq r_e) \\ 0 & (r > r_e) \end{cases} \quad (3.3)$$

ここで r は二つの粒子間の距離であり、影響範囲球を半径 r_e 以内に制限することを表している。このように遠方まで影響が及ばないように工夫することで、粒

子間相互作用を計算する回数を減らしている。

次にこの重み関数 $w(r)$ を使い、式 (3.4) のような粒子間相互作用を与える。

$$\mathbf{F}_{j \rightarrow i} = -\alpha(\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i)w(r)(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (\alpha > 0) \quad (3.4)$$

ここで $\mathbf{F}_{j \rightarrow i}$ は近傍の各粒子 j から粒子 i に作用する力、 \mathbf{r} は粒子の位置であり、 α は影響力を調整する定数である。式 (3.4) では粒子 j から粒子 i にかかる力の向きが必ず粒子 j から粒子 i の方向になるので、図 3.4 のように粒子間には斥力が働くことになる。

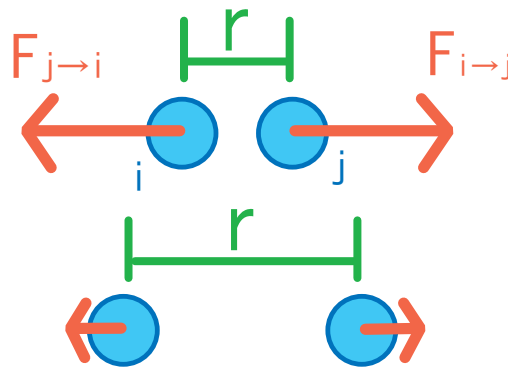


図 3.4: 粒子の斥力

また、式 (3.3) の重み関数 $w(r)$ は r が 0 に近づくとつれて値が無限に大きくなる。これにより距離が近いと空気粒子間に働く斥力が急激に増大するので、一定距離以下に近づきにくくなる。結果、粒子分布にむらを生じにくくする効果が期待できる。空気粒子は、この重み関数による影響範囲球ができるだけ重ならず、かつ距離が離れすぎないようにむらなく配置する。

3.3 ゴム膜と空気粒子の相互作用

バルーンはゴムが内部の空気によって膨らんでいるため、ゴム膜と空気との相互作用を考慮する必要がある。ここではゴム膜モデルは3角形面の集合として扱う。本研究ではゴム膜内部にオフセット領域を設定し、オフセット領域内に空気

粒子が存在した場合、その空気粒子とゴム膜の3角形面との相互作用を計算する。オフセット領域とはオブジェクトの3角形面を元に設定した干渉判定領域とし、オブジェクト内に隙間が出来ないように設定する。図3.5はオフセット領域のイメージである。

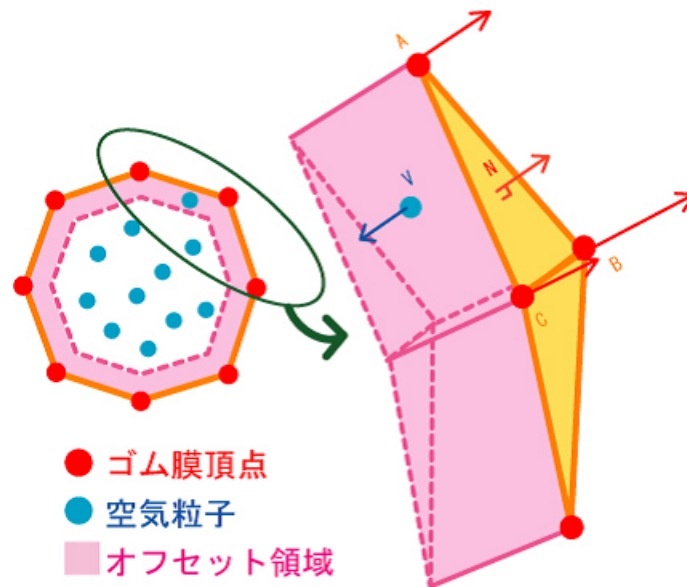


図 3.5: オフセット領域

空気粒子がオフセット領域内に入っているかは以下の手順で調べる。まず対象とする3角形面の頂点位置ベクトル A 、 B 、 C 及び実数 u 、 v 、 w を用いて、平面 α を式 (3.5) のように表す。

$$u\mathbf{A} + v\mathbf{B} + w\mathbf{C} \quad (u + v + w = 1) \quad (3.5)$$

この平面の正規化法線ベクトル \mathbf{N} は式 (3.6) で求められる。

$$\mathbf{N} = \frac{(\mathbf{B} - \mathbf{A}) \times (\mathbf{C} - \mathbf{A})}{|(\mathbf{B} - \mathbf{A}) \times (\mathbf{C} - \mathbf{A})|} \quad (3.6)$$

ここで $(\mathbf{B} - \mathbf{A}) \times (\mathbf{C} - \mathbf{A})$ はベクトル $(\mathbf{B} - \mathbf{A})$ と $(\mathbf{C} - \mathbf{A})$ の外積演算を表す。対象となる空気粒子の位置を \mathbf{V} とすると、式 (3.7) による値 d の符号によって空気粒子 \mathbf{V} が平面 α の表裏どちらにあるかがわかる。

$$d = (\mathbf{V} - \mathbf{A}) \cdot \mathbf{N} \quad (3.7)$$

ここで $(\mathbf{V} - \mathbf{A}) \cdot \mathbf{N}$ はベクトル $(\mathbf{V} - \mathbf{A})$ と \mathbf{N} の内積演算を表す。またこの d の絶対値は空気粒子 \mathbf{V} と平面 α の距離である。 $d > 0$ がであれば3角形面の表側 (オブジェクト外部) にあり、 $d < 0$ であれば裏側 (オブジェクト内部) にある。

平面 α と空気粒子 \mathbf{V} が一定の距離より近く、かつ3角形面の裏側にあると判断した場合、 \mathbf{V} を平面 α 上に射影した点 \mathbf{V}' を式 (3.8) によって求める。

$$\mathbf{V}' = \mathbf{V} - \{(\mathbf{N} \cdot (\mathbf{V} - \mathbf{A})) \cdot \mathbf{N}\} \quad (3.8)$$

射影後の点 \mathbf{V}' を平面 α 上にあると仮定すると式 (3.9) のように表せる。

$$\mathbf{V}' = u\mathbf{A} + v\mathbf{B} + w\mathbf{C} \quad (u + v + w = 1) \quad (3.9)$$

これを u, v, w について解き、 $u > 0, v > 0, w > 0$ を満たす時、 \mathbf{V}' は3角形 ABC の内部にあり、空気粒子 \mathbf{V} はオフセット領域に入っている。

次にこの空気粒子 \mathbf{V} が3角形面の頂点位置ベクトル $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ に与える力の配分は、式 (3.9) を u, v, w について解くことで求める。この $u : v : w$ が空気粒子 \mathbf{V} の3角形面の頂点 ABC に対する影響力の比率となる。

よって空気粒子 \mathbf{V} が3角形面の頂点 ABC に与える力 \mathbf{T} は式 (3.10) となる。

$$\begin{cases} \mathbf{T}_A = u\mathbf{N} \\ \mathbf{T}_B = v\mathbf{N} \\ \mathbf{T}_C = w\mathbf{N} \end{cases} \quad (3.10)$$

ゴム膜を構成する3角形面集合において、ある頂点 p を頂点に持つ3角形面は複数個存在し、その3角形面 S の集合を $S(p) = \{S_0, S_1, \dots\}$ とする。 S_i から頂点 p が受ける力を \mathbf{T}_i と置き、式 (3.10) によって算出する。また S_i の p における角度を θ_i と置く。3角形面集合 $S(p)$ からゴム膜頂点 p が受ける相互作用力の総和 \mathbf{R}_p は、式 (3.11) により算出できる。

$$\mathbf{R}_p = \frac{\sum_i (\theta_i \mathbf{T}_i)}{\sum_i (\theta_i)} \quad (3.11)$$

さらに空気粒子 \mathbf{V} には式 (3.12) のように \mathbf{N} と逆方向の力 \mathbf{F}_V を加えることでオブジェクトの外部に飛び出すことを防ぐ。

$$\mathbf{F}_V = -\beta\mathbf{N} \quad (3.12)$$

このとき β は V の移動量を調節する定数である。

このようにゴム膜の表面には外側へ向けた力を与え、空気粒子にはオブジェクト内部に向けた力を与える相互作用を計算する。

3.4 空気漏れへの対応

本手法において、粒子が接近しすぎて強い斥力がかかったり、離散時間が大きいと粒子が 1 計算ステップ中に大きく移動することがある。これにより空気粒子がオフセット領域を飛び越えてオブジェクトを貫き、外へ漏れ出してしまう弾丸貫通という問題が起きる。この問題には粒子に一度にかかる力に制限をかけるか、離散時間を細かくするなどである程度対応できるが、これらを完全に防ぐことは難しい。そこで本研究ではあらかじめ空気粒子が外部に出てしまうことを想定し、外部に出たと判断した空気粒子を強制的に内部に戻すという処理を加える。こうすることで内部の空気粒子の数を減らさずに、変形を加えることが出来る。

空気粒子の具体的な内外判定方法として、オブジェクト表面にもオフセット領域を設定し、3.3 節と同様に空気粒子がオフセット領域に入っているか判定を行う。ここではゴム膜モデルは 3 角形面の集合として扱う。空気粒子 V が式 (3.7) により 3 角形面 ABC の表側、つまりオブジェクト外部にあると判定した場合、式 (3.13) によってその面の法線 N の逆方向に移動させることで内側に戻す。

$$V'' = V - \gamma N \quad (3.13)$$

このとき γ は V'' の移動量を調節する定数である。図 3.6 は内外判定のイメージ図である。

3.6.2 節で示した判定方法により、空気粒子とその近くにあるゴム膜の 3 角面とで判定を行う。外に出たと判断した空気粒子の位置を内部に戻し、速度を初期化する。

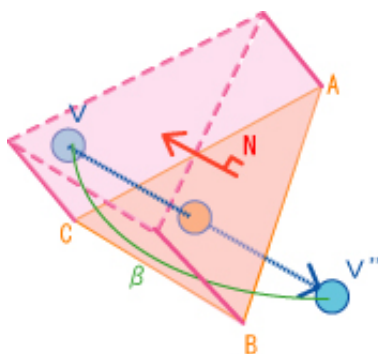


図 3.6: 内外判定

3.5 ゴム膜同士の接触

バルーンを変形すると、ゴム膜同士が接触することがある。実際バルーンは接触しても内側に入り込まないが、本手法の空気粒子とゴム膜との相互作用だけではゴム膜同士が突き抜けてしまう。そこでゴム膜面の内側にゴム膜頂点が入り込んだ場合、ゴム膜頂点を表面上に移動することで、接触を表現する。

ここではゴム膜モデルは3角形面の集合として扱う。ゴム膜頂点の具体的な内外判定方法として、3.3節と同様にゴム膜頂点とその近くにあるゴム膜の3角面とで判定を行う。ゴム膜頂点 R が式 (3.7) により3角形面のオフセット領域にあると判定した場合、さらに近接頂点の誤判定を抑えるために頂点の法線ベクトル N_p とゴム膜面の法線ベクトル N の向きを比較する。ゴム膜頂点 R がオフセット領域内にあり、法線ベクトル同士が逆を向いているという2つの条件を満たしたとき、オブジェクト内部にあると判定してゴム膜頂点 R をゴム膜表面に移動させる。ゴム膜内部にあると判定したゴム膜頂点 R は式 (3.14) により、ゴム膜の表面上の点 R' に移動させる。

$$R' = R - \{(N \cdot (R - A)) \cdot N\} \quad (3.14)$$

3.6 バブルによるクラスタ化

バブルはバルーンオブジェクトのゴム膜頂点の一部に外力を加え、ある程度絞ったらそのゴム膜頂点の位置及び速度の更新を止めることで表現する。ユーザーが指定した位置にあるゴム膜頂点 p の集合を $P(u) = \{p_1, p_2, \dots\}$ とする。 $P(u)$ の位置の平均値に向かう力を f_p として $P(u)$ に加えることで徐々にゴム膜をひねる。 $P(u)$ の位置がほぼ一致した時点で $P(u)$ の位置と速度の更新を止め、 $P(u)$ をその位置に留めることで固定し、バブルを表現する。

実際のバルーンでバブルをひねるとゴム膜が一点に集中し、バブル間で空気が分断される。しかし本手法ではバブル同士が極端に近付いた際、片方のバブルに空気粒子が流入することがある。これは空気粒子を一つの集合として扱っているため、バブルが異なっても 3.3 節の相互作用の影響が出たり、3.4 節の空気漏れ処理を行うことが原因である。そこでバブル単位でクラスタ化を行い、クラスタ内でのみ計算を行うことで相互作用を起こさないようにした。具体的にはバブルを作った段階で空気粒子およびゴム膜面にバブルの番号を ID として付与し、同一 ID を持つ空気粒子およびゴム膜面でのみ力の計算を行うこととした。

3.7 各要素に発生する力と計算手順

各要素の組み合わせで発生する力は次のようになる。

ゴム 対 ゴム : ばねモデル

空気 対 空気 : 粒子法による斥力

空気 対 ゴム : オフセット領域による相互作用

図 3.7 は提案手法のイメージ図である。

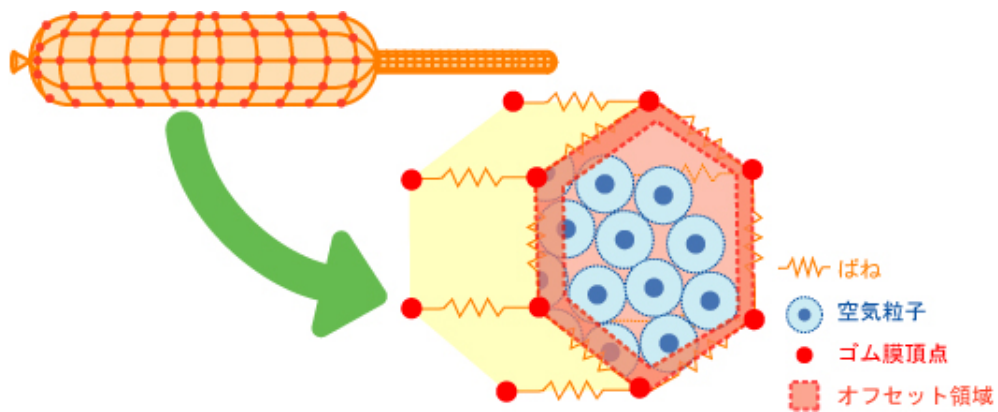


図 3.7: 提案手法のイメージ図

またゴム膜面と空気粒子はバブルごとにクラスタ化しており、同一クラスタ内でのみ計算を行う。

本提案手法の全体の計算手順を図 3.8 に示す。

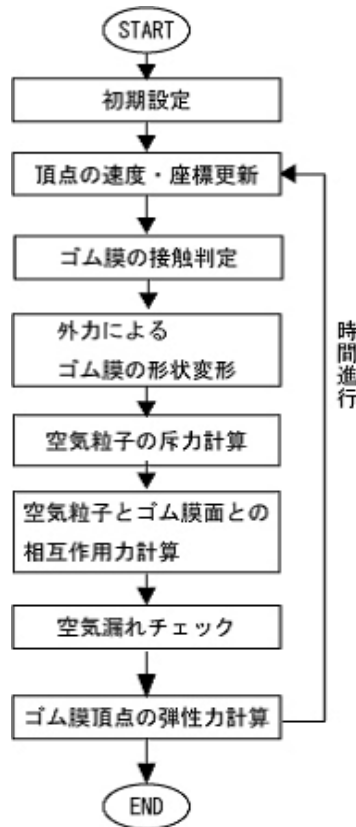


図 3.8: 計算の流れ

まず、初期時刻を t_0 、計算を離散化するための微小時間分を Δt とし、 $t_0 + \Delta t, t_0 + 2\Delta t, \dots, t_0 + n\Delta t$ と Δt ごとにステップ数 n と定める。つまり n と t は $t = t_0 + n\Delta t$ と定義できる。ステップ数 n における空気粒子 a の位置及び速度をそれぞれ $\mathbf{r}_a^n, \mathbf{u}_a^n$ とおく。さらにステップ数 n におけるゴム膜頂点 p の位置及び速度をそれぞれ $\mathbf{x}_p^n, \mathbf{v}_p^n$ とおく。

初期設定の後、3.4 節で示したゴム膜同士の接触判定を行い、式 (3.15) によりゴム膜頂点の位置を \mathbf{x}'_p に更新する。ここではゴム膜を 3 角形面の集合として扱う。

$$\mathbf{x}'_p = \begin{cases} \mathbf{x}_p^n - \{(\mathbf{N}_l \cdot (\mathbf{x}_p^n - \mathbf{x}_l^n)) \cdot \mathbf{N}_l\} & (\text{オブジェクト内部}) \\ \mathbf{x}_p^n & (\text{オブジェクト外部}) \end{cases} \quad (3.15)$$

ここで \mathbf{x}_p^n と接触判定を行うオフセット領域を持つ 3 角形面の法線ベクトルを \mathbf{N}_l 、その 3 角形面の任意の 1 つの頂点位置を \mathbf{x}_l^n とする。

次に 3.1 節から 3.4 節で示した各要素で発生する力をタイムステップ毎に求めて

いく。まず空気粒子の非圧縮性を表現するため、空気粒子同士の間隔がある程度一定になるように、粒子間距離に応じた斥力を 3.2 節で示した手法により計算する。ここで空気粒子 a の近傍の空気粒子 b の集合を $B(a) = \{b_1, b_2, \dots\}$ とする。空気粒子 b_i から空気粒子 a に作用する力 $F_{b_i \rightarrow a}$ を式 (3.4) で求め、空気粒子集合 $B(a)$ から空気粒子 a が受ける斥力の総和を C_a とし、式 (3.16) に示す。

$$C_a = \sum_i F_{b_i \rightarrow a} \quad (3.16)$$

次に 3.3 節で示したゴム膜頂点と空気粒子の相互作用力を計算する。ここではゴム膜を 3 角形面の集合として扱う。相互作用力の計算は、ゴム膜の 3 角形面が持つオフセット領域内に空気粒子が存在した場合に行うものとし、ゴム膜頂点 p が受ける相互作用力の総和 R_p は、式 (3.11) により算出できる。

次に空気粒子への相互作用力を求める。ここではゴム膜を 3 角形面の集合として扱う。空気粒子 a が複数のオフセット領域に存在した場合、空気粒子 a に影響を与える 3 角形面 k の集合を $K(a) = \{k_1, k_2, \dots\}$ とし、 k_i の法線を U_i とすると、3 角形面集合 $K(a)$ から空気粒子 a にかかる相互作用力の総和 D_a を、式 (3.17) によって求める。

$$D_a = \sum_i (-\beta U_i) \quad (3.17)$$

ここで β は粒子の移動量を調節する定数である。

次に節で示した空気漏れのチェックを行い、式 (3.18) により空気粒子 a の位置を r_p^m に更新する。ここではゴム膜を 3 角形面の集合として扱う。

$$r_p^m = \begin{cases} r_p^n - \gamma N_m & (\text{オブジェクト外部}) \\ r_p^n & (\text{オブジェクト内部}) \end{cases} \quad (3.18)$$

ここで a と接触判定を行うオフセット領域を持つ 3 角形面の法線ベクトルを N_m とし、 γ は粒子の移動量を調節する定数とする。

次に 3.1 節で示したゴム膜の弾性力を求める。ここではゴム膜を 4 角形面の集合として扱う。ここで、ゴム膜頂点 p に接続するゴム膜頂点 q の集合を $Q(p) =$

$\{q_1, q_2, \dots\}$ とする。さらに p と q_i 間の自然長を l_i 、 q_i から p に向かう方向ベクトルを $\mathbf{n}_{q_i \rightarrow p}$ とする。 $Q(p)$ から p にかかる力の総和 \mathbf{H}_p は式 (3.19) によって算出する。

$$\mathbf{H}_p = \sum_i \{k_s(|\mathbf{x}'_{q_i} - \mathbf{x}'_p| - l_i) + k_d((\mathbf{v}_{q_i}^n - \mathbf{v}_p^n)\mathbf{n}_{q_i \rightarrow p})\} \cdot \mathbf{n}_{q_i \rightarrow p} \quad (3.19)$$

これらの結果をもとにステップ数 $n+1$ における空気粒子およびゴム膜頂点の速度と位置を、式 (3.16) ~ 式 (3.19) を用いて

$$\mathbf{u}_a^{n+1} = \mathbf{u}_a^n + (\mathbf{C}_a + \mathbf{D}_a)\Delta t \quad (3.20)$$

$$\mathbf{r}_a^{n+1} = \mathbf{r}_a^n + \mathbf{u}_a^{n+1}\Delta t \quad (3.21)$$

$$\mathbf{v}_p^{n+1} = \mathbf{v}_p^n + (\mathbf{f}_p + \mathbf{R}_p + \mathbf{H}_p)\Delta t \quad (3.22)$$

$$\mathbf{x}_p^{n+1} = \mathbf{x}_p^n + \mathbf{v}_p^{n+1}\Delta t \quad (3.23)$$

と修正し、次のタイムステップに持ち越す。ここで式 (3.22) の \mathbf{f}_p はユーザ操作によって発生する外力とする。これで1タイムステップの計算が終了する。

3.8 GPGPU による高速化

この提案手法では、空気粒子間の斥力計算、空気粒子とゴム質点間の相互作用力計算など単純かつ大量の処理を行う必要がある。本研究ではユーザーが多くの変形を加えることを想定しており、ユーザーの操作に対しインタラクティブ性を高めるための高速化処理が必要となる。そのため一部の計算処理を GPGPU の技術を用いて高速化を行っている。

近年、GPU の演算資源を画像処理以外の目的に応用する技術である GPGPU (General Purpose computing on GPU) が注目を集めている。GPU とは画像処理を専門とする補助演算装置であり、シンプルな演算ユニットを多数搭載している。

そのため GPU は並行性の高い演算処理を得意としている。GPU の高性能化に伴い、この能力を画像処理だけでなく、物理シミュレーションなど他の数値演算にも利用しようというのが GPGPU のコンセプトである。

CUDA (Compute Unified Device Architecture) とは GPU 向けの C 言語の統合開発環境であり、NVIDIA[20] が提供するコンパイラやライブラリなどから構成されている。CUDA では、標準の C 言語を採用しており、汎用的なプログラムの記述が可能である。これにより物理シミュレーションや数値計算など、CG 描画以外のプログラムも記述できる。

本研究では次に挙げる部分の実装を、この NVIDIA 社の CUDA を用いて GPGPU を行った。

- ゴム膜同士の接触判定
- オフセット領域の算出
- 空気粒子間の斥力計算
- 空気粒子と面との相互作用
- 空気粒子の内外判定
- ゴム膜の弾性力計算
- ゴム膜頂点の速度と位置の積分
- 一部パラメータの初期化

これらの計算は多くの繰り返し処理が必要だが、実行結果が計算する順番に依存せずに並列処理できるため、GPGPU を使った高速化が有効である。

第 4 章

動作検証

4.1 実装

本研究では、3次元グラフィックツールキットである「Fine Kernel Tool Kit」[21]を使用しプログラミングを行った。さらに一部の実装を、NVIDIA社の「CUDA」を用いてGPGPUを行った。インターフェース部はGUIライブラリである「Lily Library」[22]を使用した。本章では提案モデルおよび挙動の有効性を検証する。各要素については以下のような設定をしている。

- ゴム膜

バルーンオブジェクトのゴム膜は頂点数 1602、面数 1600 のカプセル状の閉じた形状とした。計算量はゴム膜の頂点数及び面数に比例して増大するため、本来の 260 規格のペンシルバルーンのサイズでは計算量が膨大となる。そのため本来のサイズより短いオブジェクトで検証を行う。実物の 260 規格に換算するとオブジェクトの長さは約 20 センチである。

- 空気粒子

空気粒子はゴム膜内に縦 40, 横 4, 高さ 5 で等間隔に配置した。また空気粒子の斥力計算における影響範囲 r_e は配置間隔を 0.4 とした場合、1 とした。

- オフセット領域

オフセット領域の厚みは空気粒子とゴム膜面の相互作用に用いる厚さを 1 と

すると、ゴム膜同士の接触判定では0.2, 空気粒子の内外判定では1とした。またゴム膜と空気と相互作用及び空気漏れ判定で用いるオフセット領域は、変形による隙間の発生を抑えるために対応する3角形面よりも大きく設定した。

4.2 実行結果

実行はIntel(R) Core(TM)2 Duo CPU E8500 3.17GHz, 3.25RAM, WindowsXP Service Pack 3上で行った。またGPUはNVIDIA GeForce GTX 280を使用した。

GPGPUを用いた場合の動作フレームレートは21fps前後であった。またCPUのみで計算を行った場合の動作フレームレートは0~1fpsであった。

以下にいくつかの変形操作における実行結果とその考察を示す。なお空気粒子の挙動を見やすくするために、ゴム膜をオレンジ色の線で描画し、空気粒子を青色の点で可視化した。

4.2.1 空気の拡散

図 4.1 に空気粒子が初期位置からゴム膜内に広がる様子を示す。空気粒子はゴム膜内に均等に拡散し、さらに微量であるがゴム膜を押し広げて膨らむ様子が確認できた。

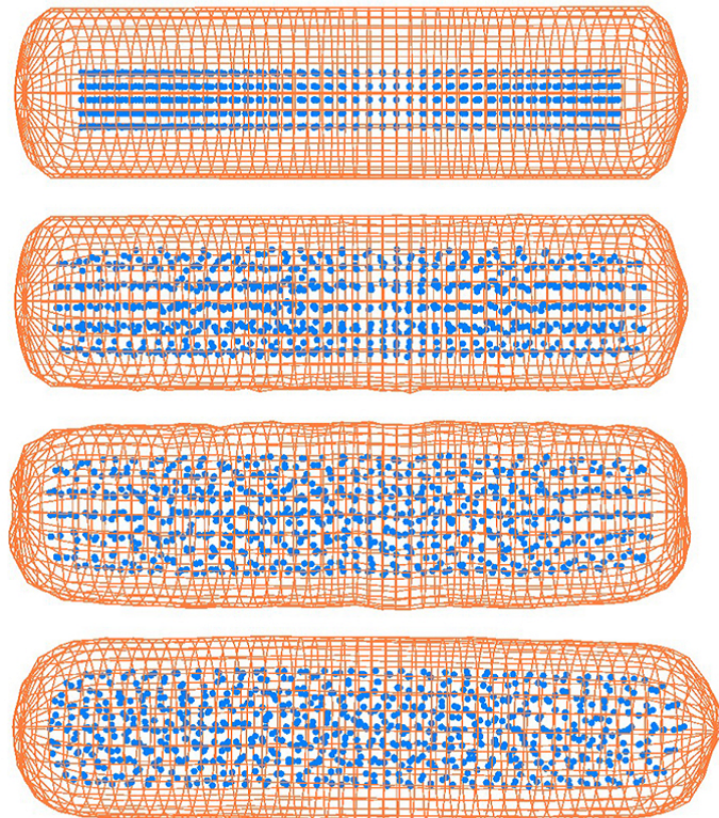


図 4.1: 空気の拡散

4.2.2 外力を加える

ゴム膜に対し外力を与えた場合の様子を図 4.2 に示す。オブジェクトの中心付近に上からの外力を加え、外力が無くなったときには形状が元に戻る様子を確認できた。

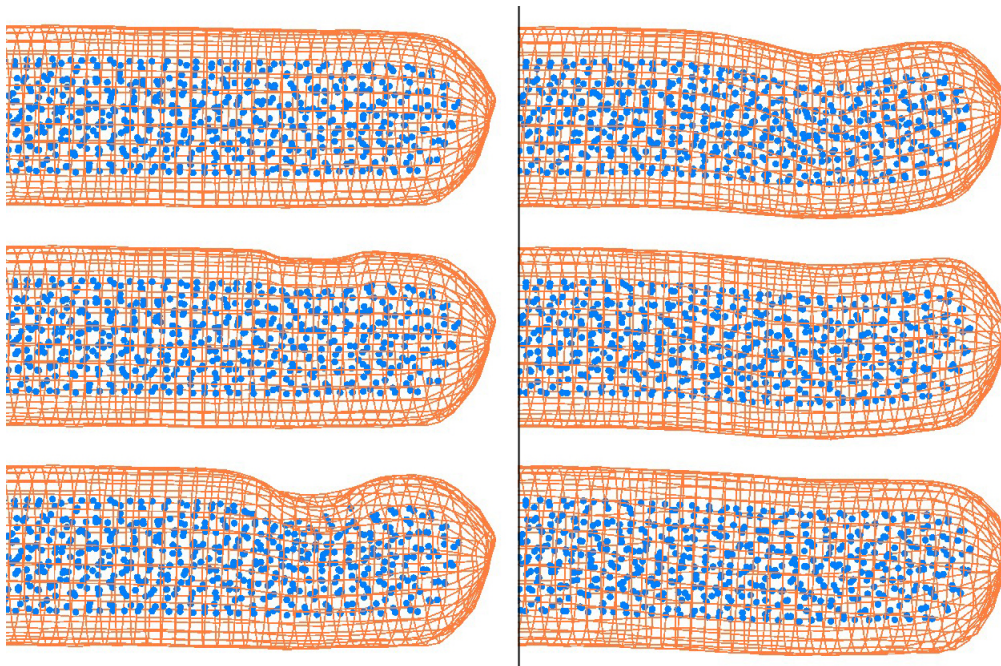


図 4.2: 外力を加える

4.2.3 バブルを作る

図 4.3 にバブルを作る様子を示す。

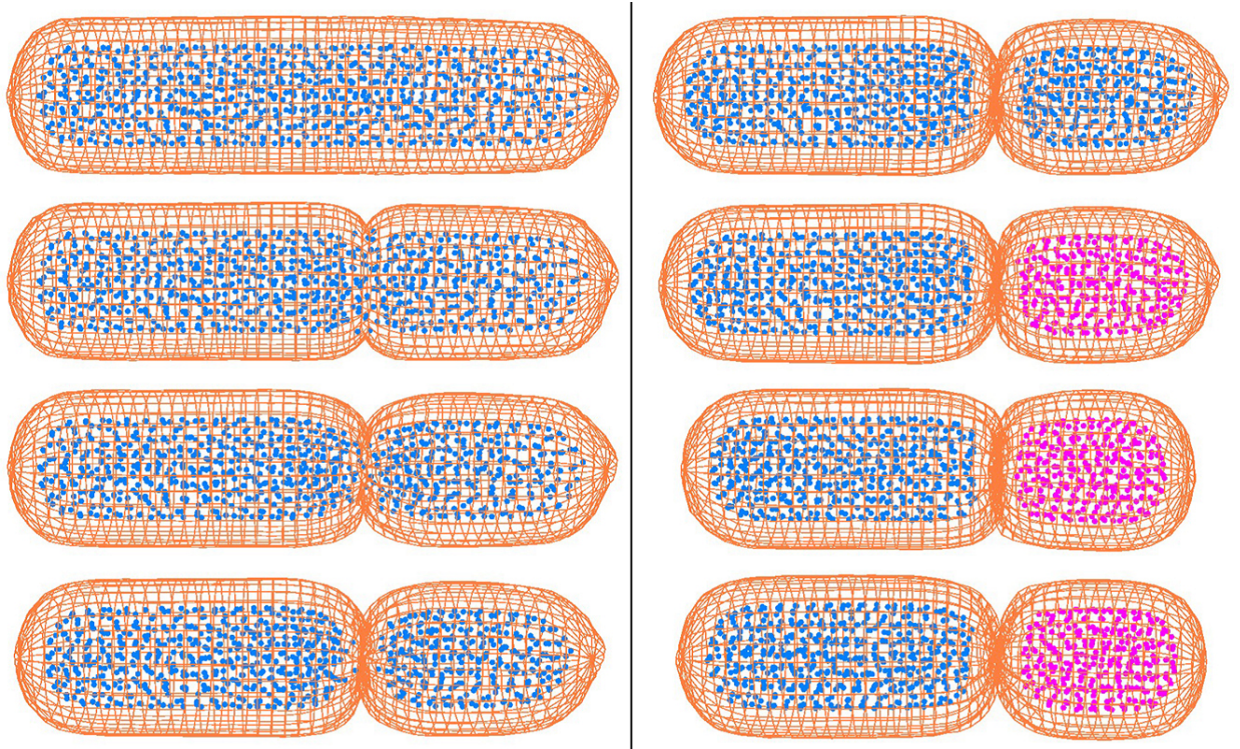


図 4.3: バブルを作る

図 4.4 に複数のバブルを作った様子を示す。一番下の画像は面を表示したものである。バブルの大きさによって形状が変わる様子が確認できる。なお空気粒子はわかりやすいようにクラスタごとに色を変えた。

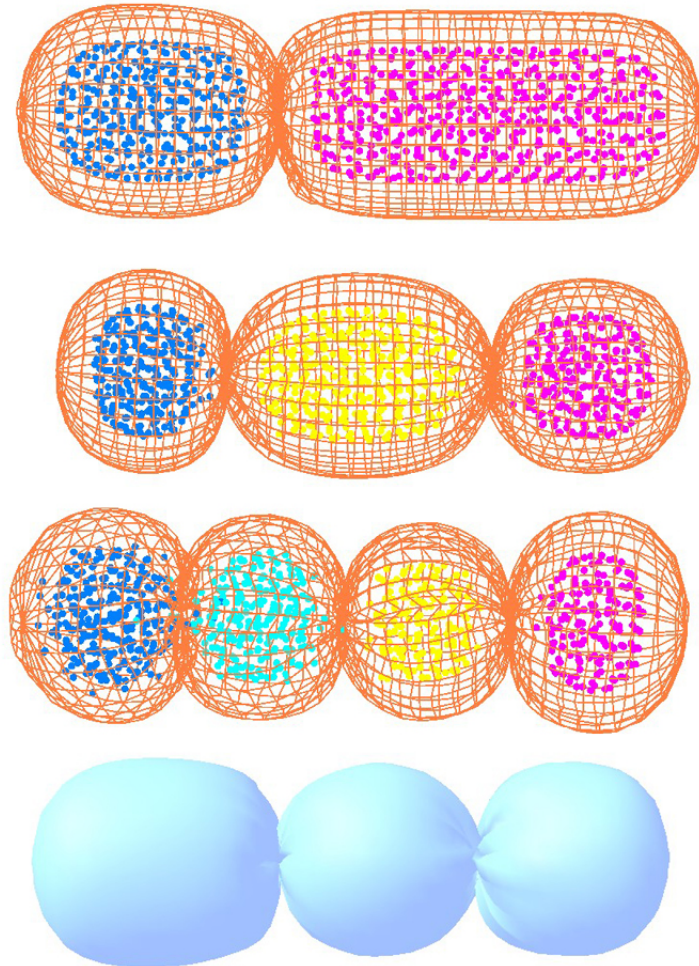


図 4.4: バブルを複数作る

図 4.5 はひねる部分の拡大図である。ゴム膜の変形に伴い、空気粒子が移動している様子が確認できた。またゴム膜が接触している部分においては、頂点が内部に貫通せず接している様子が確認できた。

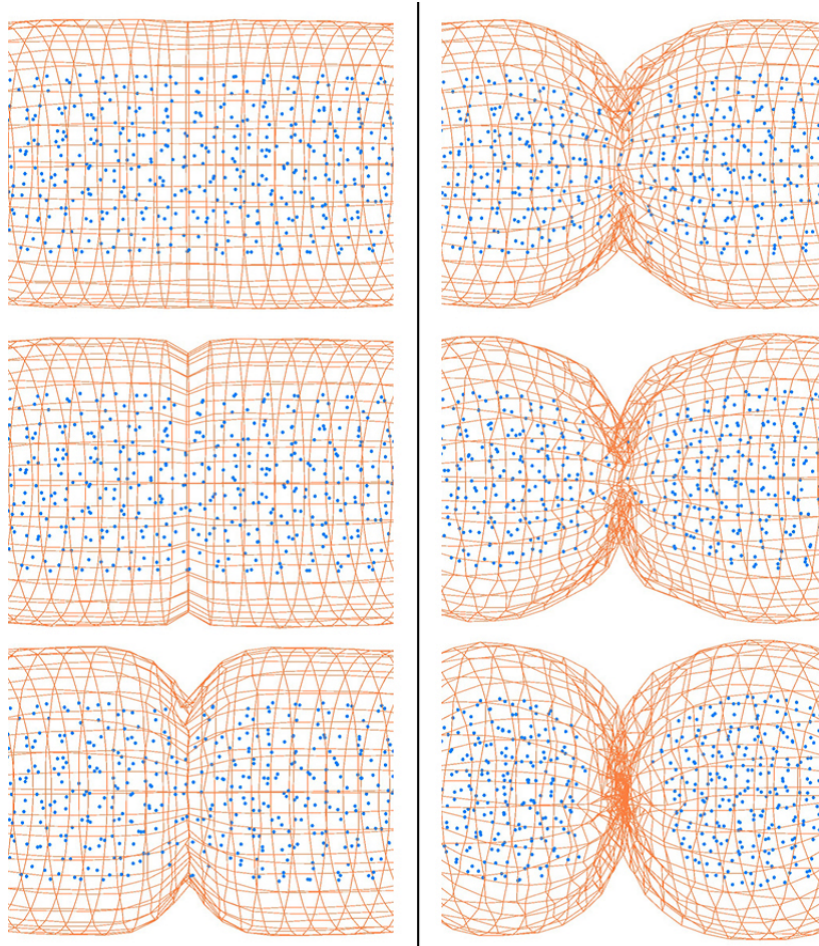


図 4.5: ゴム膜の変形に伴う空気粒子の移動

4.2.4 曲げる

図 4.6 にバブルの端に外力を加えて曲げる様子を示す。端にかけた外力により、バブル全体が変形している様子が確認できる。

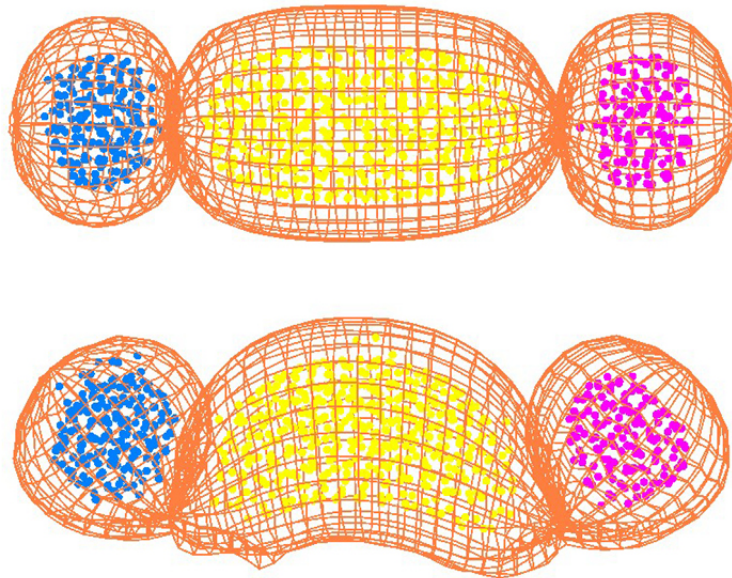


図 4.6: 曲げる

4.3 検証

バルーンモデリングの変形シミュレーションツールに用いるためのバルーンの物理特性を考慮した表現手法を検証した。ばねモデルによりゴムの弾性体の挙動を表現することができ、粒子法により内部の空気の挙動を表現できた。さらにオフセット領域による相互作用力により、ゴム膜と空気の関係を表現できた。それにより内部の空気の作用による変形を行うことができた。その結果、バルーンの膨らみと外力によるゴム膜の変形、バブルを作る操作などのバルーンの変形挙動を擬似的ではあるが表現できた。また GPGPU による高速化を行うことで、リアルタイム性のある実行速度に近い速度での変形が可能となった。

本プログラムでは、オブジェクトの挙動、オブジェクトの大きさ、実行速度を見ながら、最もバランスがとれていると思われるものを探し、各パラメータを設定している。特に空気粒子の個数と影響範囲、移動量調節のパラメータの設定は空気の量と内圧に相当するもので、設定が困難であった。オブジェクトの頂点数や面数及び空気粒子の個数に比例して計算量が増大するため、本来の 260 規格のペンシルバルーンのサイズでは計算量が膨大となり、リアルタイム性が損なわれる結果となった。ゴムは本手法で表現した特性以外にも塑性変形や相転移、指向性など様々な物理特性を有している。ロックツイストやループツイストなどの変形操作を行うには、それらの物理特性を反映した表現モデルにする必要がある。

第 5 章

まとめ

本論文の締めくくりとして、まとめと今後の展望に関して述べる。本研究ではバルーンの物理特性を考慮した変形モデルを提案した。これはバルーンモデリングにおけるオリジナル作品の設計を支援する変形シミュレーションツールでの利用を念頭に置いたものである。そこで具体的な変形を行うための基盤として、バルーンの物理特性を考慮した表現モデルを提案した。バルーンの物理特性のうち、弾性体であるゴム膜をばねモデルを用いて、また内部の空気を粒子法を参考にし表現した。さらに GPGPU を用いて、計算の高速化を行った。

本手法を用いることで物理特性を考慮したバルーンの挙動を部分的にはあるが実現できた。それにより外力によるバルーンの変形やバブルの長さによって膨らみが変化する様子を表現できた。使用している空気モデルは数値流体力学からは少し離れており、計算精度もあまり高くないが、バルーンの挙動を近似するという点においては期待できる結果となった。

今後の展望としては制作支援ツールを開発する上で実用可能な表現モデルに拡張し、実際にツールとして利用できるようにしていきたい。ゴムは本手法で表現した特性以外にも塑性変形や相転移、指向性など様々な物理特性を有している。それらの特性が複雑に絡み合い、ロックツイストやループツイストにおける広範囲の接触や、バルーンの伸びしろ部分などのバルーンらしい変形が起こっている。バルーンモデリングに関係する事象を表現することで、よりリアリティのある変形

シミュレーションを実現できると考える。また大規模な作品は複数本のバルーンを組み合わせて作るケースもあり、システム上で複数本のバルーンを扱えるようにすることでより高度な作品の制作支援が行えると考ええる。

空気粒子の数やオブジェクトを構成する頂点数が増えることにより、実行速度が低下するなど現時点ではまだ課題が残るが、コンピュータ処理性能の向上にはめざましいものがあり、物理特性を考慮した物体の変形シミュレーションを行うメリットはさらに大きくなるだろうと考える。本手法が今後の変形シミュレーションやバルーンモデリングのさらなる発展に役立つ事を願い、本論文の締めくくりとする。

謝辞

本論文を締めくくるにあたり、終始温かいご指導頂きました渡辺大地講師に心から感謝致します。また研究を進めるにあたり多くの時間を割き、適切な助言をくださいました竹内亮太氏、海上一徳氏に感謝致します。またインターフェース部の制作において、GUI ライブラリを提供頂きました渡邊賢悟氏に感謝致します。論文の執筆にあたり、多くの助言をくださいました阿部雅樹氏、佐藤和弥氏、GPGPU についてサポートして頂きました武田巧視氏に感謝致します。最も多くの時間を共有し、常に隣で支えてくれた櫻井しおりさんと、何度もあたたかい休息の場を提供してくれた大前美矢さん、さらに人生で最も充実した時間を共に歩んだ研究室のメンバーに感謝致します。そして温かく見守ってくれた家族に感謝致します。最後に、時に励まし、時に叱って、私を成長させてくれた心から信頼する方々に深く感謝致します。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] J. Mitani and H. Suzuki, "Making Papercraft Toys from Meshes using Strip-based Approximate Unfolding", ACM Trans. Graphcis, vol.23, No.3, pp.259-263, 2004.
- [2] Y. Mori and T. Igarashi. Plushie: An interactive pattern design for plush toys. ACM Transactions on Computer Graphics (ACM SIGGRAPH 2007), vol.23, No.3, Article No.45, 2007.
- [3] 畑中啓行, 生田大介, 田中敏光, 杉江昇, "仮想バルーンをモデリングするエデュティメントソフトの提案", 1997年度電気関係学会東海支部連合大会 pp.421, 1997.
- [4] 渡辺隆史, 大谷淳, "複数弾性物体を用いた対話操作が可能な弾性物体キャラクターモデルの構築法の提案", 情報処理学会 研究報告 2006-CG-122,2006.
- [5] E. Promayon, P. Baconnier, "Physically-Based Deformations Constrained in Displacements and Volume", EUROGRAPHICS '96 Volume 15,1996.
- [6] 田中正幸, 越塚誠一, "粒子法を用いた赤血球の変形シミュレーション", 日本流体力学会ながれ 第26巻(2007)第1号, 2007
- [7] 広田光一, 金子豊久, "仮想物体の弾性モデルに関する検討", 計測自動制御学会論文誌 Vol.34 No.8 pp.232-238, 1998.

- [8] 海上一徳, ”リアルタイム 3DCG における融合・分裂を考慮したソフトボディ表現”, 東京工科大学卒業論文, 2006.
- [9] Matyka. M, Ollila. M. ”A pressure model for soft body simulation”, Proc. of Sigrad, Umea, 2003.
- [10] 安藤大志, ”リアルタイム 3DCG における風を考慮した降雪表現に関する研究”, 東京工科大学卒業論文, 2003.
- [11] 越塚誠一, 「粒子法シミュレーション 物理ベース CG 入門」, 培風館, 2008.
- [12] バルーンおやじ, 「風船チャンス」, ナラン八, 2008.
- [13] 大石亜由美, 「バルーンリハビリ」, いかだ社, 2007.
- [14] マービン L. ハーディー, 「バルーン・マジック 260Q フィギュアブック」, Qualatex, 1996.
- [15] 得居 裕江, “バルーンポップ もっとしりたい ゴム風船 Q&A.” http://www.balloon-pop.com/information_nakayoku/q_a.html.
- [16] ほんけいた, 「楽しく作ろう! バルーン工作 ブティック・ムック no.731」, ブティック社, 2008.
- [17] David M.Bourg, 「ゲーム開発のための物理シミュレーション入門」, オーム社, 2003.
- [18] 恒藤敏彦, 「弾性体と流体 物理入門コース 8」, 岩波書店, 1983.
- [19] 入部綱清, 藤澤智光, ”MPS 法を用いた流体並列解析に関する基礎的研究”, 日本計算工学会, 2006.
- [20] NVIDIA. <http://jp.nvidia.com/page/home.html>.

[21] 渡辺 大地, “Fine Kernel Tool Kit System.” <http://fktoolkit.sourceforge.jp/>.

[22] 渡邊 賢悟, “Lily Library.” <http://kengolab.net/>.