

2006年度 卒業論文

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

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 M0103071
海上 一徳

2006年度 卒業論文概要

論文題目

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

メディア学部

学籍番号：M0103071

氏名

海上 一徳

指導
教員

渡辺 大地講師

キーワード

3DCG、形状変形、ソフトボディ、メタボール

ゲームやバーチャルリアリティ等のリアルタイム3DCGにおいては物体のリアルな挙動をインタラクティブに表現することが、臨場感の面で大きな役割を果たす。本研究では、その中でも弾性体物体モデルに着目し、その融合と分裂を表現する手法を提案する。融合や分裂を考慮した場合、剛体を用いたリジッドボディダイナミクスによる表現が主流であり、柔体を用いたソフトボディダイナミクスによる表現に関する研究は少ない。また、一般的にソフトボディで表現された物体は、Bezier や NURBS などのパラメトリックに表現されているため、融合・分裂を再現する際にメタボールのような陰的関数表現を必要とする場合には不向きである。

そこで、本研究では、弾性体物体を物理法則を基に表現するための手法であるバネモデルと、融合・分裂表現を比較的簡単なアルゴリズムで行える、メタボールを参考に、簡易的な弾性体モデルを用意し、融合・分裂を考慮したソフトボディのような柔らかい物体の挙動表現をリアルタイムに行うことを目的とした。この手法では、弾性体のような特性を持ちながら、融合・分裂表現を考慮することが可能である。本論文ではいくつかのシチュエーションを用意し、その妥当性を検証した。

目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	論文構成	3
第2章	既存研究と本研究の位置づけ	4
2.1	ソフトボディ表現に関する既存研究	4
2.1.1	バネモデル	4
2.1.2	有限要素法によるモデル	6
2.2	位相変化を伴う形状変形の既存手法	7
2.2.1	有限要素法も用いたモデルによる位相変化表現	7
2.2.2	バネモデルによる位相変化表現	8
2.2.3	メタボールの融合接続における位相変化表現	9
2.3	本研究の位置づけと方針	10
第3章	融合・分裂を考慮したソフトボディ表現	12
3.1	形状変形	12
3.1.1	提案モデル	12
3.1.2	外力計算	13
3.2	融合・分裂表現	14
3.3	計算手順	17
第4章	動作検証	19
4.1	実装	19
4.2	実行結果	19
4.2.1	オブジェクトに単純な外力が与えられた場合	20
4.2.2	オブジェクトの融合・分裂	21
4.2.3	複数オブジェクトによる融合・分裂	22
4.3	提案モデルの検証	23
第5章	まとめ	24
	謝辞	25

第 1 章

序論

1.1 はじめに

ゲームやバーチャルリアリティ等のリアルタイム 3DCG においては物体のリアルな挙動をインタラクティブに表現することが、臨場感の面で大きな役割を果たす。そのため、さまざまな物理現象や自然現象による表現が積極的に取り入れられている。しかし、ハードウェアの処理能力の限界等により、実現されていない表現も数多い。本研究では、その中でも物体の融合・分裂表現に着目した。融合や分裂を考慮した場合、剛体を用いたリジッドボディダイナミクスによる表現が主流であり、柔物体を用いたソフトボディダイナミクスによる表現に関する研究は少ない。また、一般的にソフトボディで表現された物体は、Bezier や NURBS などのパラメトリックに表現された曲面 [1, 2, 3] であるため、融合・分裂を再現する際にメタボールなどの陰的関数表現された曲面 [4, 5] を必要とする場合には不向きである。

自然界における物体は外力が加わることにより形状が変化し、外力がなくなれば自立的に元の状態に戻る。また、過度の外力が加わる場合には、外力がなくなっても元の形状に戻らなくなったり、物体の構成組織が破壊され形状が分断されるといった位相変化が生じる。このような物体（以下、ソフトボディと呼称する）を 3DCG において表現する手法はこれまで数多くの研究がされてきた。中でも柔物体の表現方法として、有限要素法を用いたモデル [6, 7] やバネモデル [8, 9]

があげられる。有限要素法は、対象物体を有限の要素の集合として構成し、その集合体に対して成立する連立方程式を解くものである。一方バネモデルは、対象物体を離散的な質点の集合として構成し、質点間に作用する力をバネとダンパのネットワークを用いて表現し、質点の移動計算を一般的に差分法を用いて解くものである。有限要素法を用いたモデルは、物理的な挙動を精度良く近似することができ、前処理や制約条件を用いれば形状変形においてリアルタイムでの処理が可能である。しかし、位相変形においては、前処理や制約条件の域を越えるため、リアルタイムで処理することが難しくなる。これに対し、バネモデルは変形の過渡特性や安定性に問題を残すとされるが [10]、バネモデルでの演算処理は比較的少ないため、リアルタイム性の高い処理が可能であり、質点及びスプリングのネットワークを動的に分離する等により位相変形にも実時間での対応が可能である [11, 12]。ただし、複雑な形状変形や位相変形を行うためには、物体を構成する質点数を増やす必要があり、質点数の増加に比例して計算量が増加することが問題である。

以上の考察から、本研究ではソフトボディの融合や分裂に伴う位相変化を考慮し、リアルタイムに表現することを研究対象としているため、次の2点を満たすことを想定した。

- 物理的に見て違和感の無い挙動表現
- リアルタイムでの位相変化表現

本論文では、これらの想定を満たす、リアルタイムにおける融合・分裂が可能なソフトボディ表現の実現について述べる。本研究では、実物体の持つ物理特性を擬似的に表現し、実世界に存在するソフトボディらしい挙動表現をすることが可能な、計算量の少ないモデル表現に主眼を置く。また、位相変化表現については、メタボールにおける融合表現を参考に、質点における相互作用のモデル化を行う。そして、これらを用いて融合・分裂が可能なソフトボディを試作し、提案手法の妥当性を検証する。

1.2 論文構成

本論文では第2章で既存研究について述べ、第3章で具体的な表現手法を提案、物体の融合・分裂モデルを試作する。第4章では様々な状況における実行結果とその検証、第5章で今後の展望について述べる。

第 2 章

既存研究と本研究の位置づけ

前章で述べたように、想定した 2 点を満たすためには、物理法則に近似した物体の挙動表現と、融合・分裂に伴う位相変化をリアルタイムに実現するという 2 つの条件を満たすことが必要である。本章では、2.1 節および 2.2 節において、この 2 つの条件における既存研究についてそれぞれ述べ、2.3 節では、本研究の位置づけと方針を述べる。

2.1 ソフトボディ表現に関する既存研究

ソフトボディの表現方法には、物理的な挙動に基づく手法としてバネモデルおよび有限要素法を用いたモデルが挙げられる。しかしながら、これらのモデルは一般的に多くの計算量を要することから、その高速化方法が提案されている。以下に、バネモデルおよび有限要素法によるソフトボディの表現の特徴とその高速化に関する既存研究について述べる。

2.1.1 バネモデル

バネモデルは、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。物体を離散的な有限個の質点の集合として構成し、質点間に作用する力をバネのネットワークを用いてソフトボディ特有の弾性を表現する。そして、一般に差分法に

よる数値解析により、離散時間における質点の位置を、逐次的に計算することでソフトボディの挙動を表現する。しかし、バネモデルの表現では、実物体の物理特性を直接記述することができないため、実物体の持つ物理特性を反映させた柔らかさを決定しなければならない。また、バネモデルは、変形の過渡特性と計算の安定性に問題があるとされる [10]。変形の過渡特性の問題とは、バネに外力が与えられた場合、そのバネに接続している隣接質点にしか力の伝播が行われなため、過度に外力が加わると、バネモデルの構造が局所的に破壊されてしまうのである。この問題を解決するために、バネモデルの粘性率を高めるか、または、剛性の変形モデルを加味することによって過度の力の発生を防ぐという方法がある [9]。計算の安定性の問題とは、数値計算における誤差がその解に大きく影響する問題であり、具体的には差分法における離散時間間隔を大きくとり過ぎると、バネモデルが振動・発散してしまうのである。そのため、バネモデルが振動・発散しない上限値以下の離散時間間隔を経験的に決定する必要がある。また、バネモデルを用いて複雑な挙動を表現するためには、多くの質点およびバネのネットワークを用いてソフトボディを表現する必要がある。しかし、それらの増加に比例してバネモデルの 1 サイクルあたりの計算量が増加してしまうという問題もある。

バネモデルでは、四面体格子や立方体格子の構成要素を組み合わせることによって物体を表現する。立方体格子では、表現する物体に合わせて、面上や格子内の対角線上にも、バネのネットワークが張られる。また、バネのネットワークにダンパを加えることにより、変形挙動に粘性を与える。また、格子を構成する稜線上のバネ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。計算の簡略化のために、物体が均質で等方性の変形挙動を仮定した場合、一般に、バネモデルの構成要素は立方体格子を利用し、稜線数、面上の対角線数、立方体上の対角線数の合計 28 本のバネのネットワークを用いて表現する。図 2.1 はその様子を示したものである。ただし、格子の稜線上および面上のバネは隣接する格子と共有されている。また、格子は一樣の質量を持つとして各質点に等価な質量を与える。

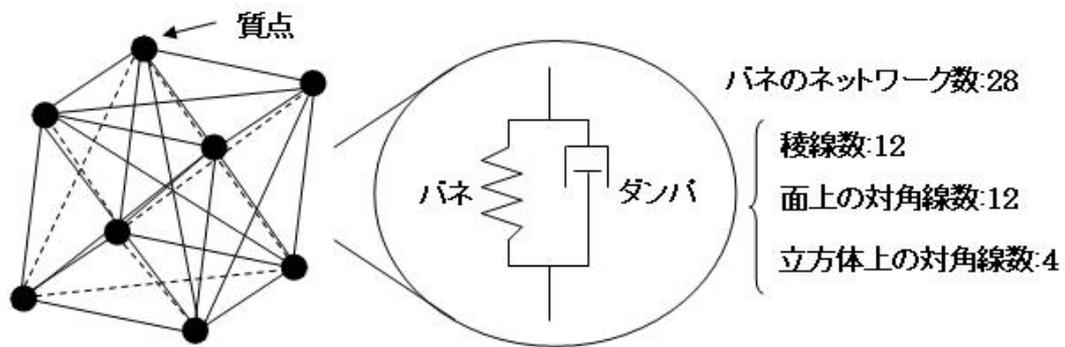


図 2.1: バネモデルの構成要素

2.1.2 有限要素法によるモデル

弾性要素の変形に応じた物体の再構築に関する研究については、有限要素法における変形が大きい部分の要素を小さい要素に分解する方法 [13] がある。有限要素法とは数値解析手法の 1 つで、一般に粘弾性解析、クリープ解析、といった構造力学分野で広く利用されている手法 [14] である。計算対象を有限の範囲にモデル化し、その内部を小さな要素で区切り、各々の要素内で成り立つ連立 1 次方程式を作成する。次に、各要素における方程式を全解析領域分足し合わせることで大きな連立 1 次方程式を作成し、近似解を求める方法である。有限要素法は、実物体の持つヤング率やポアソン比などの物理特性を直接記述できるため、物体を精度良く表現することが可能であるが、膨大な計算量を必要とするため、リアルタイムでの処理には不向きとされる。

有限要素法では、対象物体全体の変形と外力の関係を、(2.1) 式に示す剛性方程式によって表現する。

$$F = \begin{bmatrix} K \end{bmatrix} \delta \quad (2.1)$$

ここで、 F は物体に与えられる外力であり、 δ はその結果生じる物体の歪（変位）

である。 $[K]$ は物体の柔らかさを決定するための剛性行列である。外力が与えられたときの物体の歪を求めるには、剛性行列 $[K]$ の逆行列を求める必要があるが、不定であるため、それを求めることに膨大な計算量が必要となる。このことが、リアルタイム処理を行う際の問題点になる。

この問題に対して、物体の位相が変化しない状況下、すなわち物体の変形状態によって剛性行列が変化しない場合には、その逆行列を予め計算しておくことで、リアルタイムでの弾性変形を可能とした手法がある [6]。また、前処理において、予め変形操作に対する物体の変位を計算しておき、その計算結果をファイルに格納しておくことで、リアルタイムに弾性変形を実現した手法がある [7]。

ところで、有限要素法における変形をバネモデルに応用した研究が報告されている [15]。このモデルは大変形部分のみ要素解像度を高められるため処理効率の良いモデルとして評価できるが、変形が大きくなるにつれて処理速度が低下するため、リアルタイム処理には不向きである。

2.2 位相変化を伴う形状変形の既存手法

物体に過度の力が与えられ断裂が生じた場合、物体には位相変化が起こる。物理法則に基づく位相変化表現には、バネモデルおよび有限要素法を用いたモデルそれぞれにおいて研究されている。また、物理特性を考慮してはいないが、柔らかく、滑らかなサーフェスを表現する手法として、メタボールによる表現が挙げられる。以下に、バネモデル、有限要素法を用いたモデル、メタボールによる位相変化表現の既存研究についてそれぞれ述べる。

2.2.1 有限要素法も用いたモデルによる位相変化表現

有限要素法を用いたモデルでの位相変化変を実現するためには、断裂した物体をモデル化する必要がある。位相変化のアニメーションを実現した方法 [16] では、位相変化の発生する場所やその方向を、物体の変形に伴って生じる応力を解析す

ることによって決定し、これに基づいて物体を再構成することで物体の断裂表現を実現している。しかし、この方法では制約条件や前処理の域を越えるため、リアルタイムでの実現はなされていない。

2.2.2 バネモデルによる位相変化表現

バネモデルでは、計算 1 サイクルあたりの計算量が比較的少ないことから、リアルタイムでの位相変化を伴う変形が実現されている [9]。ここで、バネモデルを用いて位相変化を実現した既存研究について述べる。

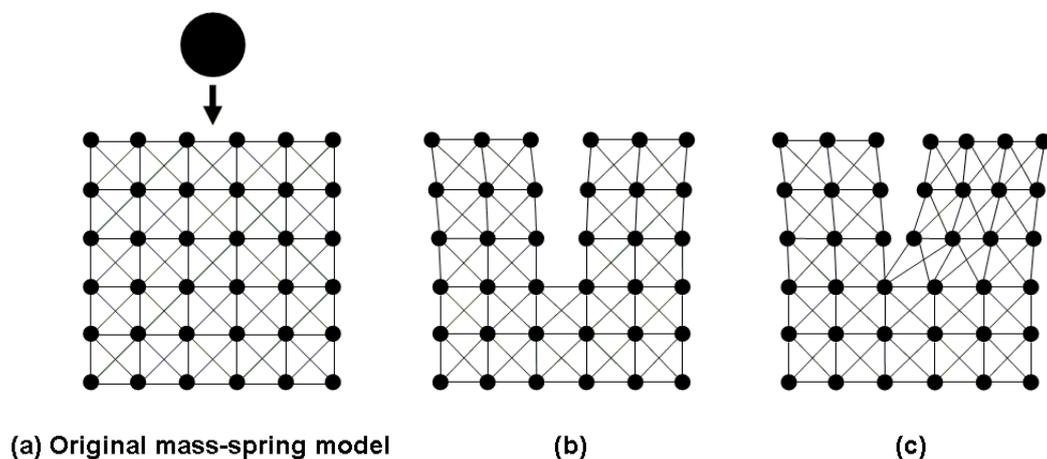


図 2.2: バネモデルによる位相変化のモデル

図 2.2(a) に示すように、バネモデルに外力が加わり変形操作が行われバネモデルが極度に変形し、図 2.2(b) に示すような、バネが閾値以上伸びた場合、そのバネを含む格子を構成するバネを切断する手法 [11, 12] や、図 2.2(c) のように、質点に閾値以上の力が加えられた場合に、その質点を分裂させ、新しくバネのネットワークを生成する手法 [9, 12] がある。図 2.2 はその様子を示したものである。前者の手法は、閾値を越えたバネを単に削除することによって位相変化が実現できることから、変形に要する計算量が少なく、質点とバネに関するデータ構造が簡単化できる。しかし、位相変化によって体積を失うことから写実性に問題がある。

この問題に対して、格子数を増やすことによって解決することも可能であるが、同時にバネモデルの計算量も増加してしまうことが難点である。後者の手法は、体積が保持できることから、前者の写実性の問題を解決することができる。しかし、質点の分離や新しいバネのネットワークの生成のために計算量が増加する問題がある。

2.2.3 メタボールの融合接続における位相変化表現

物体の位相変化を擬似的に行う手法として、メタボールによる融合接続表現がある。メタボールは、3DCG のモデリング技法の一つであり、中心からの距離によって一定の法則で濃度が変化する仮定の濃度球を使って、ある一定の閾値を形状の表面とする。2つの濃度球が近づくと濃度が加算され、お互いに向き合った面が突き出したり融合接続をしたりする。その様子を図 2.3 に示す。また、メタボールを可視化するためのレンダリングには、さまざまな方法がある。中でも最もよく使われるのは、レイ・トレーシング法、およびマーチングキューブ法である。レイキャスティング法では、光線を分岐させるだけの比較的簡単なアルゴリズムで極めて高品位な画像を生成できるが、膨大な計算量を必要とするため、リアルタイム処理には不向きである。マーチングキューブ法は一般的に等値面のポリゴン化に用いられる手法で、あらかじめ生成した 3 次元格子内部で等値面がどのように構成されているかを判定する。

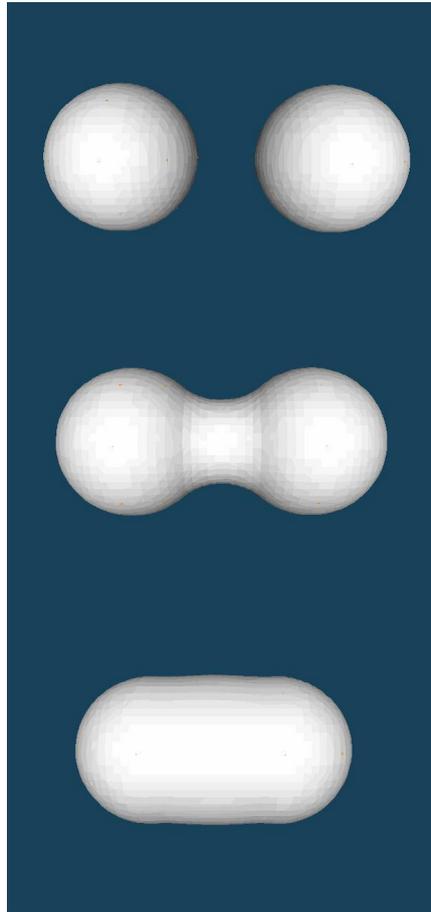


図 2.3: メタボールによる融合接続

2.3 本研究の位置づけと方針

本節に至るまで、ソフトボディにおける融合・分裂表現をリアルタイムに行うために必要となる、想定した2つの条件に沿う既存研究について述べた。有限要素法を用いたソフトボディ表現では、実物体の持つ物理特性を直接記述できることから、物理的に正確なソフトボディ表現が可能である。しかし、反面計算量が多く、前処理や制約条件を適用しても、リアルタイムでの位相変化を実現することは困難である。一方バネモデルは、物理特性を反映する従来法を用いてソフトボディを表現することが可能であり、質点やバネの本数に依存するが、その変形

挙動はリアルタイムでの弾性変形および位相変化に対応している。しかし、複雑な変形を実現するために質点やバネの本数が増加した場合には、変形挙動が遅く感じられる問題がある。また、メタボールによる表現では、融合・分裂に伴う位相変化を比較的簡単なアルゴリズムで表現できるが、物理特性を考慮したものではないため、物理シミュレーションを行うことは難しい。

本研究で手法を考案する上で重要なことは、リアルタイムシミュレーションが可能であり、かつリアルさを失わないことである。そこで本研究では、実物体の持つ物理特性を擬似的に表現し、実世界に存在するソフトボディらしい挙動表現をすることが可能な、計算量の少ないモデル表現に主眼を置く。また、位相変化表現については、メタボールにおける融合表現を参考に、質点における相互作用のモデル化を行う。そして、これらを用いて融合・分裂が可能なソフトボディを試作し、提案手法の妥当性を検証する。

第 3 章

融合・分裂を考慮したソフトボディ表現

3.1 形状変形

3.1.1 提案モデル

まず、形状を変形させるためのソフトボディモデルを考える。本論では、物体が外力が加わることにより形状が変化し、外力がなくなれば自立的に元の状態に戻るといった弾性体の特性を、バネモデルを参考にした手法を提案する。バネモデルでは隣接する 8 つの粒子間との相互作用に、バネが元に戻ろうとする張力と粒子間の速度差に比例して働く減衰力（ダンピング）により、物体の挙動を表現している。提案手法では、モデルを構成する各頂点の位置をあらかじめ記憶させておき外力により形状が変化した場合、記憶させておいた位置に戻るような力（以下、復元力）を働かせ、伸縮の特性を近似する。図 3.1 はその様子を示したものである。

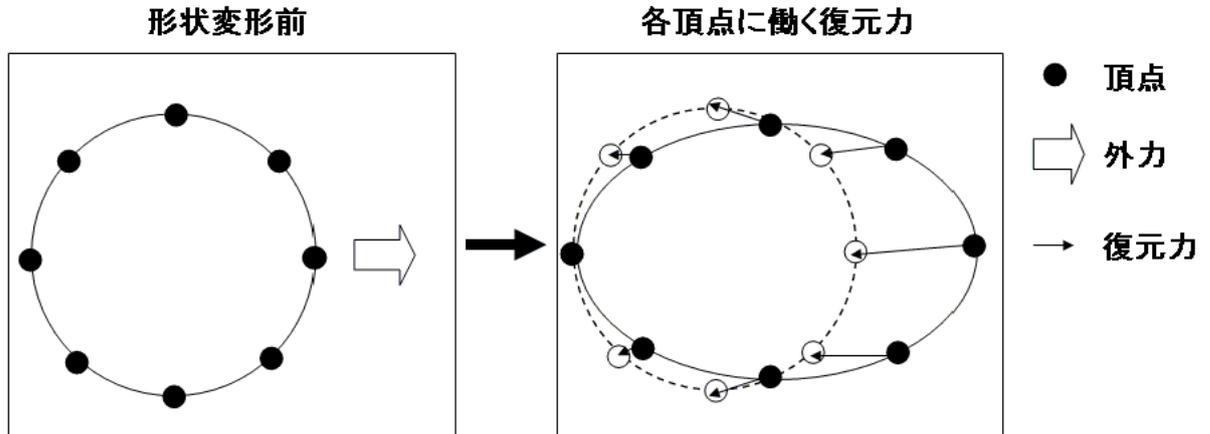


図 3.1: 提案モデルの簡略図

具体的な計算には、単純な減衰振動を用いる。質量 m の質点に、平衡点からのずれ x に比例する復元力と、速度 dx/dt に比例する抵抗が働くとき、減衰振動の運動方程式は (3.1) 式ようになる。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -mw^2 x - 2mk \frac{dx}{dt} \quad (3.1)$$

整理すると

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -w^2 x - 2k \frac{dx}{dt} \quad (3.2)$$

ここで w は復元力の大きさを与えるパラメータ（固定角振動数）であり、 k は速度抵抗の大きさを与えるパラメータ（バネ定数）である。これは x の変位が大きくなれば復元力も大きくなることを表している。

3.1.2 外力計算

ソフトボディシミュレーションには一般に質点に外力を与え、隣接する質点の相互作用によるフィードバックにより弾性体のシミュレーションを行う。しかし、

処理が複雑化し計算量が増加することや、形状の大変形が起こった場合、計算が破綻してしまうことが予想されるため、本提案手法では質点間の相互作用は考えずに、質点と力点との相互作用のみによって物体の挙動を求めることを考える。そこで、外力計算には数値流体力学 [17] の粒子法 [18] の 1 つである、MPS 法 [19] における粒子間相互作用モデルに着目する。

3.2 融合・分裂表現

本提案手法ではオブジェクトに対して、重み関数を定義し、その影響する範囲も限定する。各々のオブジェクトには、後述する重み関数の原点を定義する。この点をオブジェクトの中心点と呼ぶ。この中心点はオブジェクトの内部に存在しなければならない。また、重み関数の有効範囲を示す球をオブジェクトを内包するように定義する。この球の中心点はオブジェクトの中心点と一致する。この球を影響範囲球と呼ぶ。図 3.2 はその簡略図を示したものである。

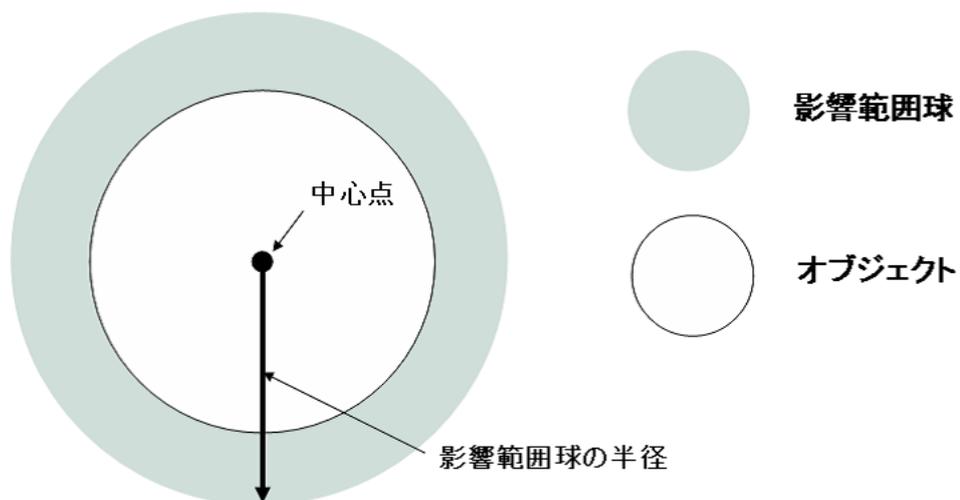


図 3.2: オブジェクトの中心点、影響範囲球

具体的な重み関数の式としては次のようなものを用いる。

$$W(r) = \begin{cases} \frac{r_e - r}{r_e} & r \leq r_e \\ 0 & r_e < r \end{cases} \quad (3.3)$$

図 3.3 はオブジェクト間距離に応じた影響力の違いを示したものである。ここで r はオブジェクトの頂点 (図 3.3) と、影響範囲球の原点 (図 3.3) との距離であり、影響の及ぶ範囲を影響範囲球の半径 r_e 以内に制限していることを表している。これにより、オブジェクト間の距離に応じた影響力を与えることができる。

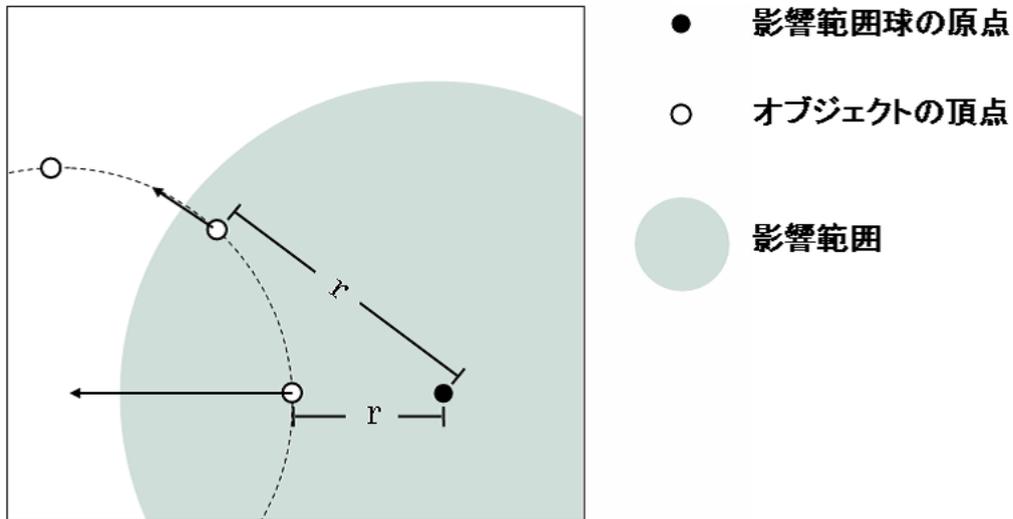


図 3.3: オブジェクト間距離に応じた影響力

さらに、本手法ではこの重み関数を用いて次のような相互作用を与える。

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

ここで $\vec{F}_{j \rightarrow i}$ は有効範囲球の中心点 j からオブジェクトの頂点 i に作用する力、 \vec{r} はオブジェクトの頂点座標であり、 α は影響力の大きさを調整する定数である。(3.4)

では力のベクトルの向きがオブジェクトの頂点 i から有効範囲球の中心点 j に向かうため、オブジェクトには引力が働くことになる。また、(3.3) 式では r が 0 のとき最大値 1 となる。さらに (3.4) と同様に、

$$\overrightarrow{F_{j \rightarrow i}} = -\beta(\vec{r}_j - \vec{r}_i)W(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \quad (\beta > 0) \quad (3.5)$$

とすると、オブジェクトには影響範囲球の中心点 j からオブジェクトの頂点 i の方向に力のベクトルが向かうため、斥力を働かせることができる。ここで用いた β は α と同様に、影響力の大きさを調整するための定数である。

ここで、本提案手法では (3.4) 式と (3.5) 式を、オブジェクト同士の間距離に応じてそれぞれ切り替えることで、物理特性に近似した融合・分裂を表現する。

3.3 計算手順

本提案手法の全体の計算手順を図 3.4 に示す。

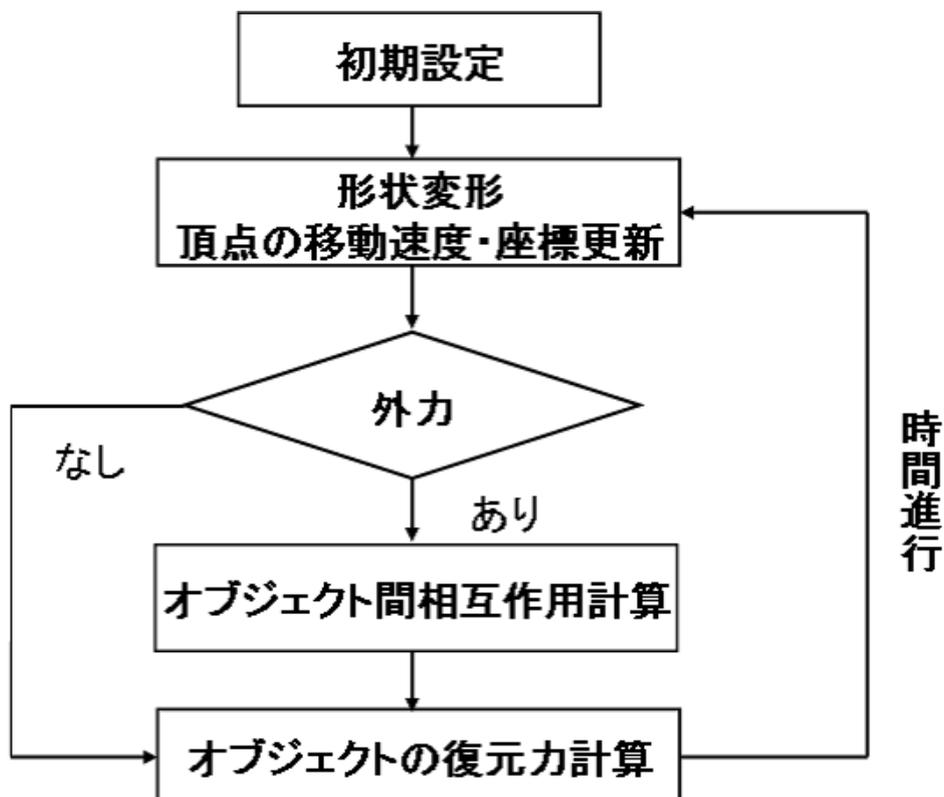


図 3.4: 計算のながれ

まず、時刻 n におけるオブジェクトの頂点座標及び速度をそれぞれ \vec{r}_i^n, \vec{u}_i^n とおく。物体の形状を変形させるための影響力 \vec{F} を (3.4) 式または、(3.5) 式より計算し、その速度、座標を (3.9), (3.10) 式によって \vec{r}_i^*, \vec{u}_i^* に更新する。

$$\vec{u}_i^* = \vec{u}_i^n + \vec{F}_i^n \Delta t \quad (3.6)$$

$$\vec{r}_i^* = \vec{r}_i^n + \vec{u}_i^* \Delta t \quad (3.7)$$

次に、(3.2) 式より、復元力の計算を行う。物体の元の形状を記憶させるための固定座標を \vec{l} とおき、復元力を T とすると、

$$\vec{T} = w^2(\vec{l} - \vec{r}_i^*) - (2k\vec{u}_i^*) \quad (3.8)$$

となる。この結果をもとに、時刻 $n + 1$ におけるオブジェクトの頂点の移動速度と座標を

$$\vec{u}_i^{n+1} = \vec{u}_i^* + \vec{T}_i^n \Delta t \quad (3.9)$$

$$\vec{r}_i^{n+1} = \vec{r}_i^* + \vec{u}_i^{n+1} \Delta t \quad (3.10)$$

と更新し、これで1タイムステップの計算が終了する。なお、影響力が無くなった場合、オブジェクトには単純な減衰振動が働くことになる。

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」[20]を使用しプログラミングを行った。本章では、提案手法を用いて試作したシステムを通して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。

- オブジェクト設定

今回用いたオブジェクトの形状は、単純な球に限定した。1つのオブジェクトにつき、266個の頂点を持っている。

- 各種パラメータ設定

オブジェクト間相互作用における影響範囲 r_e はオブジェクトの半径を R とした場合、 r_e の $\sqrt{2}$ 倍として計算を行っている。また、影響力調整用の係数 α は小さめにし、極端に形状が変形しないように設定してある。

4.2 実行結果

実行は Pentium(R) D 2.80GHz,2GBRAM,Windows XP 上で行った。以下にはいくつかのシチュエーションにおける実行結果とその考察を示す。

4.2.1 オブジェクトに単純な外力が与えられた場合

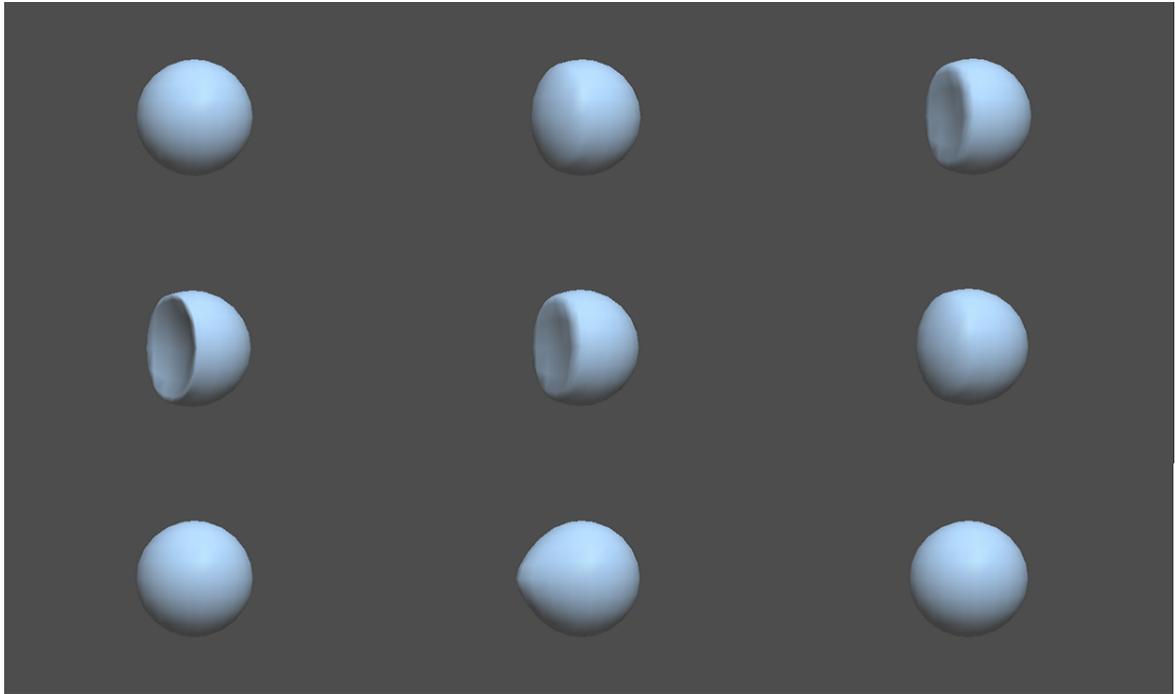


図 4.1: 外力による形状の変化

オブジェクトに対し外力を与えた場合の様子を図 4.1 に示す。

オブジェクトの左方向より外力が加わり、外力が無くなったときには形状が波打つように元の状態に戻る様子が確認できた。

4.2.2 オブジェクトの融合・分裂

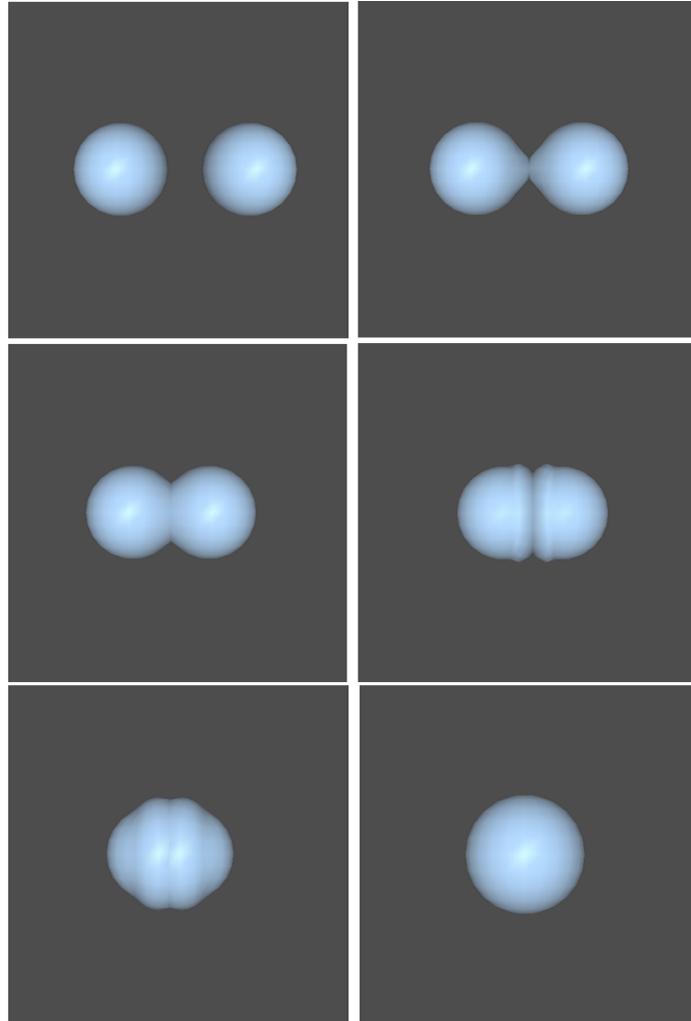


図 4.2: オブジェクトの融合・分裂

図 4.2 は、2つのオブジェクトを用いた融合・分裂をする様子を示したものである。総頂点数は 532 個であり、動作フレームレートは 30 前後であった。

オブジェクト同士が近づくにつれて徐々に融合し、距離に応じて形状が変化していく様子が確認できた。

4.2.3 複数オブジェクトによる融合・分裂

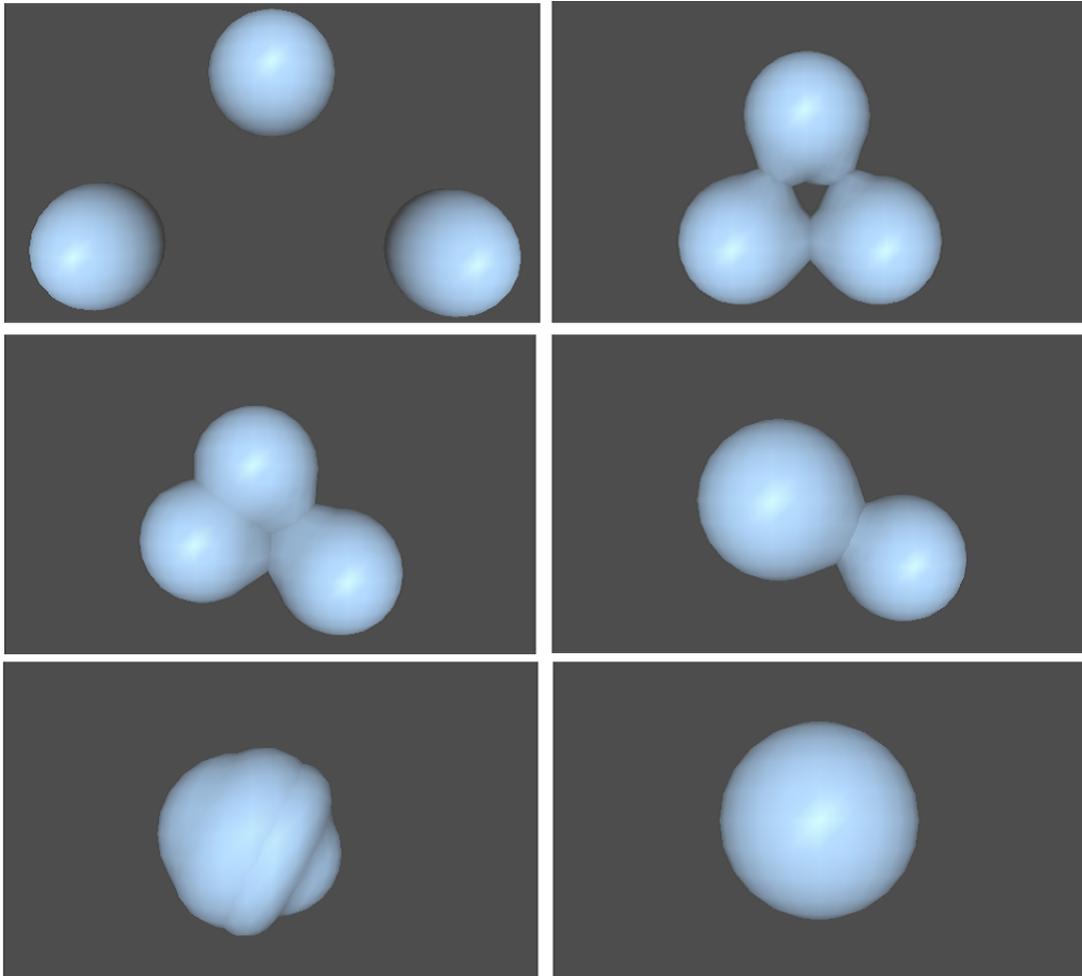


図 4.3: 複数オブジェクトの融合・分裂

更に、3つのオブジェクトを用いて、動作検証を行った。総頂点数は798個であり、動作フレームレートは24前後であった。図4.3はそれを示した結果である。

この場合も各オブジェクト同士の距離に応じて、滑らかに形状が変化していく様子が確認できた。

4.3 提案モデルの検証

オブジェクトの質点に単純な減衰振動を加えることによって、弾性体の挙動を表現することは、擬似的にはあるがソフトボディの挙動を再現でき、質点と影響範囲の距離に応じた引力・斥力を与えることで、メタボールのような融合・分裂表現が再現できた。

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。特に影響範囲球の範囲はオブジェクトの大きさに依存しているため、オブジェクト同士の大きさが極端に違くと、融合・分裂時の挙動が破綻してしまうという現象が起きた。また、頂点数の増加に比例して実行速度が低下していくという問題がある。これは、衝突判定処理を改善することで、より高速な実行を可能とすることが期待できる。

第 5 章

まとめ

本手法を用いることで、ソフトボディにおける融合・分裂表現をリアルタイムで実現できた。提案したモデルは実物体の物理特性を加味してはいないが、演出・臨場感の面で大きな効果が期待できる結果となった。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はめざましいものがあり、汎用のソフトボディモデルとして、ゲームなどのリアルタイムコンテンツに応用することが十分期待できる。

謝辞

本論文を締めくくるにあたり、終始温かいご指導ならびに適切な助言をくださいました、渡辺大地講師および竹内亮太氏に心からの感謝の意を表します。また、共に学び、共に歩んできた研究室メンバーに深く感謝致します。

最後に、温かく見守ってくれた家族に感謝致します。

参考文献

- [1] 西村仁志, 平井誠, 河合利幸, 河田亨, 白川功, 大村一, “分布関数による物体モデリングと画像生成の一手法”, 電子通信学会論文誌, Vol.J68-D(4), pp.718-725, 1985.
- [2] Jules Bloomenthal, Ken Shoemake, “Convolution Surfaces”, Proc. of SIGGRAPH '91, Vol.25(4), pp.251-256, 1991.
- [3] James F. Blinn, “A Generalization of Algebraic Surface Drawing”, ACM Trans. on Graphics, Vol.1(3), pp.235-256, 1982.
- [4] 黒瀬能幸, “3次元図形処理工学”, 共立出版株式会社, 1999.
- [5] 三浦曜, 中嶋孝行, 大野敏則, “CAD・CG技術者のためのNURBS早わかり”, 工業調査会, 1994.
- [6] 広田光一, 金子豊久, “柔らかい仮想物体の力覚表現”, 情報処理学会論文誌, Vol.39, No.12, pp.3261-3268, 1998.
- [7] S. Cotin, H. Dlingette and N. Ayache, “Real-Time Elastic Deformations of Soft Tissues for Surgery Simulation”, IEEE Trans, Visualization and Computer Graphics, Vol. 5, No. 1, pp.62-72, 1999.

- [8] 廣瀬伸吾, 森和夫, 李敏業, 加納裕, “VR ベース 3 次元意匠形状作成システム-基本システムの概念および試作-”, 日本バーチャルリアリティ学会第 5 回大会論文集, Vol.5, pp.221-224, 2000.
- [9] S. Miyazaki, J. Ueno, T. Yasuda, S. Yokoi and J. Toriwaki, “A Study of Virtual Manipulation of Elastic Objects with Destruction”, Proc. IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication, pp.26-31, 1995.
- [10] 広田光一, 金子豊久, “仮想物体の弾性モデルに関する検討”, 計測自動車制御学会論文誌, Vol.34, No.8, pp.232-238, 1998.
- [11] A. Norton, G. Turk, B. Bacon, J. Gert and P. Sweeney, “Animation of Fracture by Physical Modeling”, Visual Computer, Vol.7, pp.210-219, 1991.
- [12] M. Holton and S. Alexander, “Soft Cellular Modeling: A Technique for Simulation of Non-rigid Materials”, R. Earnshaw and J. Vince(Eds.), Computer Graphics: Developments in Virtual Environments, Academic Press, pp.449-460, 1995.
- [13] O. Zienkiewicz, J. Zhu, “Adaptivity and Mesh Generation”, International Journal for Numerical Method in Engineering, 34, pp.783-810, 1991.
- [14] 三好俊郎, 有限要素法入門, 培風館, 1994.
- [15] 河合裕文, 松宮雅俊, 佐藤哲, 山澤一誠, 竹村治雄, 横矢直和, “弾性体のバネモデルの疎密表現による計算量削減手法”, 日本 VR 学会第 5 回大会論文集, pp.229-232, 2000.
- [16] J. F. O'Brien and J. K. Hodgins, “Graphical Modeling and Animation of Brittle Fracture”, Proc. ACM SIGGRAPH '99, pp.137-146, 1999.
- [17] 矢川元基編著, 『パソコンで見る流れの科学』, 講談社, 2001.

- [18] 越塚誠一著, 『数値流体力学』, 培風館, 1997.
- [19] 越塚誠一, 「粒子法による流れの数値解析」, 日本流体力学会ながれ 21 巻 3 号, 230-239, 2002.
- [20] 渡辺大地, “Fine Kernel Tool Kit System”,
<<http://www.teu.ac.jp/media/~earth/FK/>>.