

NAIST-IS-MT9951032

修士論文

疎密バネモデルを用いた柔物体の
仮想環境下における力覚提示を伴う変形操作

河合 裕文

2001年2月9日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

河合 裕文

審査委員： 横矢 直和 教授
千原 國宏 教授
竹村 治雄 助教授

疎密バネモデルを用いた柔物体の 仮想環境下における力覚提示を伴う変形操作*

河合 裕文

内容梗概

近年，計算機によって仮想的な環境を構築し，実世界での様々な事象を疑似体験することが可能な仮想現実感技術が注目されている．この技術を用いて，皮膚や臓器といった，柔物体との力覚提示を伴う対話操作を実現することは，より臨場感の高い仮想環境を構築する上で必要不可欠である．

実世界に存在する柔物体は，対話操作によって弾性変形や位相変形が生じる．また，対話操作による柔物体の変形挙動や反力は，柔物体の変形状態や柔物体を操作するマニピュレータの速度に応じて変化したものとなる．そのため，仮想環境下における柔物体との対話操作には，(1) 物理法則に基づく実時間での柔物体の挙動表現，(2) 対話操作時の速度に基づく相互作用のモデル化の 2 つの要件を満たす必要がある．従来，有限要素法やバネモデルを用いて，柔物体との対話操作を実現したものがあるが，(1) の要件に対しては実時間性に問題があり，(2) の要件に対しては速度に基づく相互作用としては不十分であった．

本論文では，(1) の要件に対して，一般的に柔物体の表現に用いられるバネモデルを基盤とし，柔物体の変形の度合に応じて，運動計算に必要な最低限のバネを動的に選択することにより，少ない計算量で柔物体の表現が可能な疎密バネモデルを提案する．また (2) の要件に対して，柔物体を構成する質点とマニピュレータの非弾性衝突として扱うことにより，それらの速度に基づく相互作用のモ

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT9951032, 2001年2月9日.

デル化を行う。これらの提案手法を用いて、仮想環境下における柔物体との力覚提示を伴う対話操作システム試作し、本手法の有効性と妥当性を確認した。

キーワード

柔物体, バネモデル, 疎密表現, 破壊表現, 対話操作, 力覚提示, 仮想環境

Elastic Object Manipulation with Force Feedback Using Coarse-to-fine Representation of Mass-Spring Models in Virtual Environment*

Hirofumi Kawai

Abstract

One of the key technologies for creating realistic virtual environments is real-time simulation of elastic object deformation with force feedback. In real world, an elastic object has a variety of geometrical and topological deformations. To realize a manipulation with such an elastic object in virtual environment, there are two important issues: (1) real-time behavioral representation of elastic object based on physics, and (2) simulation model of mutual collision between an elastic object and a solid object taking collision velocity into consideration. In previous works, there are a number of elastic object manipulation systems based on finite element methods or mass-spring models. However, they have some problems concerning real-time elastic deformation and have no sufficient collision simulation models.

This paper proposes an efficient method of elastic object deformation using mass-spring models with coarse-to-fine representation based on the degree of deformation for the first issue, and a model of the mutual collision based with velocity consideration for the second issue. The effectiveness and the validation

*Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT9951032, February 9, 2001.

of the proposed techniques is confirmed through experiments with a newly developed manipulation system with force feedback.

Keywords:

elastic object, mass-spring models, coarse-to-fine representation, destruction, interactive manipulation, force feedback, virtual environment

目次

1. はじめに	1
2. 従来研究と本研究の位置づけ	4
2.1 柔物体の表現とその高速化に関する従来研究	4
2.1.1 有限要素法	4
2.1.2 バネモデル	5
2.2 対話操作時の相互作用のモデル化に関する従来研究	8
2.2.1 God-object Method による相互作用のモデル化	9
2.2.2 質点に基づく相互作用のモデル化	10
2.3 本研究の位置づけと方針	11
3. バネモデルによる柔物体の表現	14
3.1 バネモデルの構成要素	14
3.2 質点の運動生成	14
3.3 物理特性を反映したパラメータの決定	15
4. 疎密バネモデルによる柔物体の挙動表現	17
4.1 疎密バネモデルの定義と処理手順の概要	17
4.2 疎密バネモデルによる弾性変形	19
4.3 疎密バネモデルによる位相変形	22
5. 柔物体とマニピュレータの相互作用のモデル化	24
5.1 衝突処理	24
5.2 力覚提示	25
6. 試作システムによる有効性と妥当性の検証	26
6.1 試作システム	26
6.2 柔物体との対話操作の例	27
6.3 計算時間の評価	30
6.4 相互作用の妥当性	31

6.4.1	柔物体の変形挙動の考察	31
6.4.2	マニピュレータが柔物体から受けた反力の考察	33
6.4.3	まとめ	39
7.	おわりに	43
	謝辞	44
	参考文献	45

目 次

1	位相変形のモデル	7
2	God-object Method の概要	9
3	サンプリングに依存する侵入量の例	10
4	柔物体バネモデルの構成要素	15
5	柔物体の疎密表現によるバネの選択	17
6	疎密バネモデルによる運動生成の処理手順	18
7	階層的バネモデル	19
8	疎密バネモデルの生成過程	21
9	線形補間による求められていない質点の位置・速度の算出	22
10	質点とマニピュレータの衝突処理	25
11	柔物体の対話操作システム	27
12	対話操作による柔物体の変形	29
13	検証の概要	32
14	マニピュレータの侵入量と速度の違いによる挙動結果：柔物体 (1) (ヤング率 $E = 0.2 \times 10^4 [N/m^2]$)	34
15	マニピュレータの侵入量と速度の違いによる挙動結果：柔物体 (2) (ヤング率 $E = 1.0 \times 10^4 [N/m^2]$)	34
16	マニピュレータの侵入量と速度の違いによる挙動結果：柔物体 (3) (ヤング率 $E = 5.0 \times 10^4 [N/m^2]$)	35
17	経過時間とマニピュレータの速度の違いによる挙動結果：柔物体 (1) (ヤング率 $E = 0.2 \times 10^4 [N/m^2]$)	35
18	経過時間とマニピュレータの速度の違いによる挙動結果：柔物体 (2) (ヤング率 $E = 1.0 \times 10^4 [N/m^2]$)	36
19	経過時間とマニピュレータの速度の違いによる挙動結果：柔物体 (3) (ヤング率 $E = 5.0 \times 10^4 [N/m^2]$)	36
20	マニピュレータの速度による質点の変位の違い (速度 1 [m/s])	37
21	マニピュレータの速度による質点の変位の違い (速度 15 [m/s])	37
22	マニピュレータの速度による質点の変位の違い (速度 30 [m/s])	38

23	マニピュレータの速度による反力の違い：柔物体 (1) (ヤング率 $E = 0.2 \times 10^4 [N/m^2]$)	40
24	マニピュレータの速度による反力の違い：柔物体 (2) (ヤング率 $E = 1.0 \times 10^4 [N/m^2]$)	41
25	マニピュレータの速度による反力の違い：柔物体 (3) (ヤング率 $E = 5.0 \times 10^4 [N/m^2]$)	42

表 目 次

1	柔物体の表現における有限要素法とバネモデルの関係	11
2	相互作用のモデルの関係	12
3	使用した機材	28
4	柔物体とマニピュレータのパラメータ	28
5	疎密バネモデル生成における格子分割の閾値	28
6	1 サイクルあたりの計算時間とバネの本数の関係	31

1. はじめに

近年，計算機によって仮想的な環境を構築し，実世界での様々な事象を疑似体験することが可能な仮想現実感技術が注目されている．この技術は，危険な現場での作業や失敗の許されない手術の訓練・教育・手順の確認，建築・機械などの設計，アミューズメントといった様々な分野で用いられている．

仮想環境下における仮想物体との対話操作は，実世界での操作と同じように行えることが望まれる [1]．実際には，マウスやキーボードなどによって操作することも可能であるが，我々が日常行う，物体を掴む，握るといった動作とは大きく異なる．また，物体を操作しても力覚がフィードバックされないため，直感性，対話性，臨場感は，実際の操作とは異なる．そこで，グローブ型手形状入力装置や力覚提示装置などを用いて，実世界での操作と同様の方法で，仮想環境下での対話操作を実現する方法が研究されてきた [2, 3, 4, 5, 6, 7]．これらの研究では，日常的な動作による対話操作の実現に重きがおかれ，対象とする物体は，形状が変化しない剛体を扱っていた．そのため，対話操作の相互作用によって生じる物体の変形挙動については，ほとんど検討されていなかった．例えば，手術の訓練などで必要となる皮膚や臓器といった，対話操作によって形状が変化する柔物体との対話操作を実現するためには，対話操作時の相互作用による柔物体の変形挙動を表現する必要がある．

皮膚や臓器などの実世界に存在する柔物体は，外力により形状が変化し，外力がなくなれば自律的に元に戻るといった弾性変形が生じる．また過度に外力が加わる場合には，物体の組織が破壊され形状が分断されるといった位相変形が生じる．仮想環境下において，このような特徴を持つ柔物体との力覚提示を伴う対話操作を実現することは，実世界に近い仮想環境を構築する上で必要不可欠である．

物理法則に基づく柔物体の表現方法として，有限要素法 [8, 9] やバネモデル [10, 11, 12] が挙げられる．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のネットワークを用いて表現し，質点の運動計算を一般的に差分法を用いて解くものである．

有限要素法を用いて柔物体との対話操作を実現した例として、文献[8]では、対話操作時の相互作用に、変形操作を行うマニピュレータの柔物体内部への侵入量に応じて相互作用を決定する God-object Method[13] を用いて、柔物体との対話操作を実現している。また、文献[9]では、生物機械工学の分野における臓器の変形データを用いて肝臓を表現し、先と同様の相互作用によって、手術シミュレーションシステムを実現している。これらの対話操作では、マニピュレータによって柔物体を押したり、突いたりする操作が可能で、実時間での弾性変形を実現している。しかし、位相変形を行うためには膨大な計算量が必要となるため、実時間での位相変形に対応することは困難である。

一方、バネモデルを用いた例には、God-object Method によって相互作用のモデル化を行い、粘土細工モデリングを実現したものや[10]、顔部への変形操作を実現したものがある[11]。また、マニピュレータ内への柔物体を構成する質点の侵入量によって相互作用のモデル化を行い、押したり、引っ張るといった対話操作による、弾性変形および位相変形を実現したものがある[12]。しかし、バネモデルを用いた柔物体の表現において複雑な変形挙動を実現するためには、多くの質点およびバネのネットワークを用いて柔物体を表現する必要がある。そのため、それらの増加に比例してバネモデルの計算量が増加し、シミュレーション計算における時間と現実における時間とを一致させることが困難となる。その結果、実時間での対話操作においては、変形操作に対する柔物体の変形挙動が遅く感じられるようになる問題が生じる。

また、上述した全ての相互作用のモデルは、柔物体やマニピュレータの速度に基づくモデルではない。実世界において、対話操作による柔物体の変形挙動や、その時に返される反力は、対話操作時のそれらの速度に応じて異なったものとなることから、上述の相互作用のモデルでは、これを再現することは困難である。その他、物理法則に基づく正確な相互作用の従来研究もあるが[14, 15, 16, 17, 18]、計算量が多いため、実時間での対話操作に用いるためには、簡略化した相互作用のモデル化が必要である。

以上の考察から、柔物体との力覚提示を伴う対話操作を実現するためには、次の2つの要件を満たすことが必要である。

- 物理法則に基づく実時間での柔物体の挙動表現
- 対話操作時の速度に基づく相互作用のモデル化

本論文では，これらの要件を満たす，仮想環境下での力覚提示を伴う柔物体との対話操作の実現について述べる．(1)の要件に対しては，柔物体の実時間での弾性変形および位相変形が表現可能な柔物体の表現手法として，柔物体の変形の度合に応じて，運動計算に必要となる最低限のバネを選択することにより，少ない計算量で柔物体の表現が可能な疎密バネモデルを提案する．(2)の要件に対しては，柔物体を構成する質点とマニピュレータとの非弾性衝突として扱うことにより，速度に基づく相互作用のモデル化を行う．そして，これらの提案手法を用いて，柔物体との力覚提示を伴う対話操作システムを試作し，本手法の有効性と妥当性を検証する [19, 20] ．

以下，2章では，柔物体の表現とその高速化に関する従来研究，対話操作時の相互作用のモデル化に関する従来研究，および本研究の位置づけと方針についてそれぞれ述べる．3章では，バネモデルによる柔物体の表現について述べ，4章において，疎密バネモデルによる柔物体の表現手法を述べる．そして，5章では，柔物体とマニピュレータの相互作用のモデル化について述べ，6章では，試作システムを通して提案手法の有効性と妥当性について検証を行う．最後に7章で本論文のまとめを述べる．

2. 従来研究と本研究の位置づけ

前章で述べたように，柔物体との対話操作を実現するためには，(1) 物理法則に基づく実時間での柔物体の挙動表現，(2) 対話操作時の速度に基づく相互作用のモデル化の2つの要件を満たす必要がある．本章では，2.1節および2.2節において，この2つの要件における従来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 柔物体の表現とその高速化に関する従来研究

物理法則に基づく柔物体の表現方法には，代表的に有限要素法やバネモデルが挙げられる．これらの柔物体の表現は，一般に多くの計算量を要することから，その高速化方法がそれぞれ提案されている．以下に，有限要素法およびバネモデルによる柔物体の表現の特徴とその高速化に関する従来研究についてそれぞれ述べる．

2.1.1 有限要素法

有限要素法は，変形操作に対し無限の自由度を持つ物体を，有限の自由度をもつ要素（有限要素）の集合体として近似し，この集合体に対して成立する連立1次方程式を解く方法である．有限要素法は，ヤング率やポアソン比といった実物体の持つ物理特性を直接記述できるため，精度良く物体を表現することができる．一般に，粘弾性解析，クリープ解析，疲労解析といった構造力学の分野で広く利用されている [21]．しかし，膨大な計算量を必要とするため，実時間性の高い用途には不向きとされる．

【有限要素法の実時間性の問題と高速化に関する従来研究】

有限要素法では，対象物体全体の変形と力の関係を，式(1)に示す剛性方程式によって表現する．

$$\{F\} = [K]\{\delta\} \quad (1)$$

ここで， $\{F\}$ および $\{\delta\}$ は，物体に与えられる外力およびその結果生じる物体の

ひずみ(変位)であり, $[K]$ は物体の柔らかさを決定する剛性マトリクスである. ある力が加えられた時の物体のひずみを求めるためには, 剛性マトリクスの逆行列を求める必要がある. ところが, この剛性マトリクスの逆行列は不定であるため, それを求めることに膨大な計算量が必要となる. これが, 実時間性の高い用途に適用する際の問題点である.

この問題に対し, 物体の線形性が仮定でき, かつ物体の位相(強制変位境界条件)が変化しない状況下においては, 物体の変形状態によって剛性マトリクスが変化しないということを利用し, その逆行列を予め計算しておくことで, 対話操作による実時間での弾性変形を実現した方法がある [8]. 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, ファイルに格納しておくことによって, 実時間での弾性変形を実現した方法がある [9].

【位相変形の実現】

過度に力が加えられた場合に生じる物体の破壊表現, すなわち位相変形を実現するためには, そのモデル化が必要となる. 位相変形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, これに基づき物体を再構成することによって, 位相変形のアニメーションを実現した方法がある [22]. しかし, 上述の従来研究における制約条件や前処理の域を越えるため, 位相変形を含む柔物体の表現を実時間で行うことは困難である.

2.1.2 バネモデル

バネモデルは, 柔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表現する. そして, 一般に差分法による数値解法により, 離散時間における質点の位置を, 逐次的に計算することによって柔物体の運動を表現する.

【物理特性を反映する柔らかさの決定】

バネモデルによる柔物体の表現では, 実物体の物理特性を直接記述できないため, 実物体の持つ物理特性を反映させた柔らかさを決定する試みが行われている. 物体を均質であると仮定し, 物理学における, ひずみとヤング率およびポアソン

比の関係式から，バネモデルで表現する柔物体の柔らかさを，ヤング率を設定することにより求める方法がある [23]．また，実物体から得られる計測情報に基づく柔らかさの決定の試みも行われている [11, 24]．実物体に加えた力と，その時の物体の変位の関係を計測し，バネモデルにおける力の計算値と計測値との誤差が最も小さくなるように柔らかさを決定する方法がある [11]．また，CT 画像から得られる CT 値を基に，FCM(Fuzzy C-Means) 法により，空気，骨，筋肉や脂肪などに分類を行って，例えば骨ならば堅く，脂肪ならば柔らかくといった，それらの特性に基づいて，柔らかさを決定する方法がある [24]．

【変形の過渡特性と計算の安定性の問題】

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 [25]．変形の過渡特性の問題は，バネモデルの計算 1 サイクルあたりの力の伝搬が，バネに接続する隣接質点にしか伝搬されないことに起因する．このため，バネモデルに過度に力が加わる場合には，隣接質点だけにその力が伝搬される．その結果，バネモデルの構造が局所的に破壊されてしまう問題が生じる．この問題に対し，一般的に，バネモデルの粘性率を高めることによって，過度な力の発生を防ぐ方法がある．また，剛性の変形モデルを加味することによって，同様に過度な力の発生を抑制する方法がある [12]．次に，計算の安定性の問題は，運動生成を行う際の数値計算における“ 硬い問題 (Stiffness Problem) ” [26] に相当する．これは，数値計算における僅かな誤差がその解に大きく影響する問題で，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・発散してしまう問題である．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．

【位相変形の実現】

上述したように，場合によっては問題が生じるバネモデルであるが，バネモデルの計算 1 サイクルあたりの計算量が比較的少ないことから，対話操作による弾性変形および位相変形が実現されている [12]．ここで，バネモデルを用いて位相変形を実現した従来研究について述べる．

図 1(a) に示すように，柔物体を操作するマニピュレータによって変形操作が行

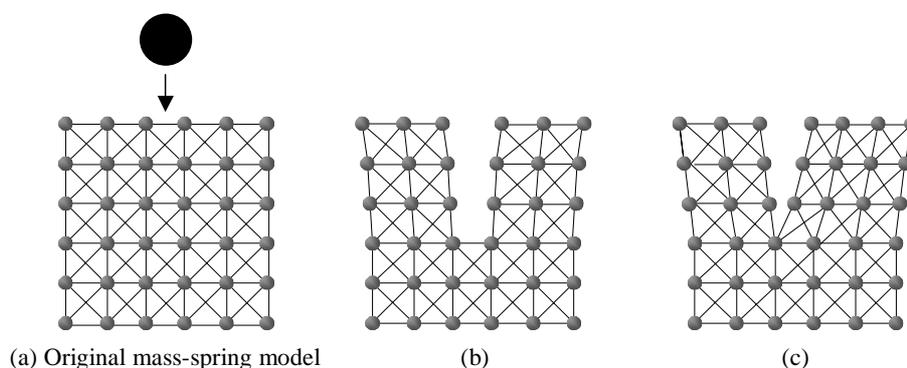


図 1 位相変形のモデル

われ，バネモデルが極度に変形した場合に，図 1(b) に示すような，バネが閾値以上伸びた場合に，そのバネを含む格子を構成するバネを切断する方法 [34, 35] や，図 1(c) に示すような，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方法 [12, 35] がある．前者の方法は，閾値を越えたバネを単に削除することによって位相変形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，位相変形によって体積を失うことから写実性に問題がある．この写実性の問題を，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，格子数の増加によって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．後者の方法は，体積が保存できることから，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対話操作時の計算量が増加する問題がある．

【バネモデルの実時間性の問題と高速化に関する従来研究】

バネモデルを用いて複雑な変形挙動を実現するためには，多くの質点およびバネのネットワークを用いて柔物体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する．そのため，シミュレーション計算における時間と現実の時間を一致させることが困難となり，実時間での対話操作においては，変形操作に対する柔物体の変形挙動が遅く感じられ

るようになる問題が生じる。この変形挙動が遅く感じられる問題に対し、差分法に用いる離散時間間隔を大きく設定し、シミュレーション計算における時間経過を早く進めることによって解決することが考えられる。しかし、質点およびバネのネットワークが増加した場合には、差分法における離散時間間隔を小さく設定しないと安定な解が得られない。そのため、質点およびバネのネットワークが増加した場合には、バネモデルの1サイクルあたりの計算量が増加するだけでなく、シミュレーション計算における時間経過も遅くなる。そのため、結局、変形操作に対する柔物体の変形挙動が遅く感じられるようになる。

この問題が、力学的な変形を記述するバネモデルと、対象物体を記述するポリゴンモデルとが、その構造を共有していることに起因していることに着目し、それらを独立の構造として持たせ、変形操作を行う方法がある[27]。これにより、粗く表現したバネモデルの変形に合わせて、細かく表現したポリゴンモデルを変形することによって、高速な物体の変形を実現している。しかし、この方法による変形は塑性的な変形であり、他の変形は考慮していないため、連続的な対話操作による弾性変形や位相変形に対応させることは困難である。

また、陰的オイラー法を用いたバネモデルの運動計算を行い、差分計算に用いる時間間隔を大きく設定しても、数値的に安定な解が得られる方法がある[28]。この方法により、シミュレーション計算における時間経過を早く進めることができる。しかし、陰的数値解法は、逆に1サイクルあたりのバネモデルの計算量を増加させるため、変形操作に対する物体の反応が遅くなる。そのため、実時間の対話操作に用いるためには、この方法の導入のみでは不十分である。

2.2 対話操作時の相互作用のモデル化に関する従来研究

実世界において、対話操作による柔物体の変形挙動や、その時に返される反力は、対話操作時のそれらの速度の応じて異なったものとなる。そのため、仮想環境において、これを再現するためには、柔物体とこれ进行操作するマニピュレータの、対話操作時の速度に基づく相互作用のモデル化が必要である。ここで相互作用のモデル化とは、柔物体とマニピュレータの衝突処理、および力覚提示のモデル化のことである。以下に、柔物体との対話操作を実現した従来研究における、

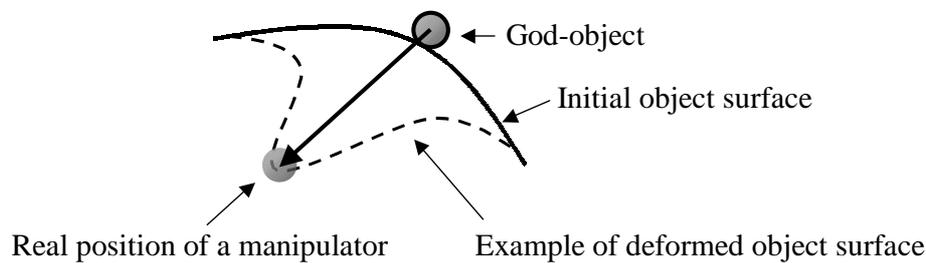


図 2 God-object Method の概要

代表的な 2 つの相互作用のモデルについて述べる。

2.2.1 God-object Method による相互作用のモデル化

有限要素法およびバネモデルによって表現される柔物体との対話操作で用いられている相互作用のモデルとして、God-object Method[13]がある。この方法は、図 2 に示すように、マニピュレータが物体の内部に侵入した場合に、仮想的なマニピュレータ（これを God-object と呼ぶ）を定義し、これを变形前の物体表面にとどまらせ、実際のマニピュレータの位置との変位ベクトルを取得し、これに基づいて相互作用を行う方法である。

有限要素法における対話操作では、この変位ベクトルを、式 (1) に適用できるように適切に変換し、物体の变形および力覚提示する反力の計算を行っている [8, 9]。また、バネモデルにおける対話操作では、この変位ベクトルによって質点を強制移動させ、変位ベクトルの大きさに比例する反力を力覚提示している [10, 11]。力覚提示は、少なくとも約 300Hz の更新が必要とされるが [29]、God-object Method による力覚提示は、変位ベクトルを求めれば力覚提示が可能なことから、柔物体の变形計算量に依存しない、高速な力覚提示の更新が可能である。しかし、God-object Method は、本来形状が変化しない剛体との対話操作における力覚提示を想定した方法である。また、実世界では、同じ変位ベクトルであっても、慣性などの影響によって自律的に挙動する柔物体の变形状態や、マニピュレータの速度に応じて、対話操作時の柔物体の变形や反力が異なる。そのため、

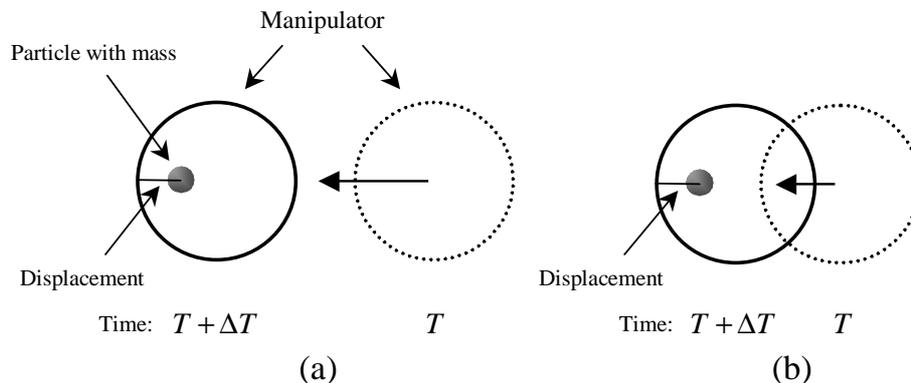


図 3 サンプルングに依存する侵入量の例

文献 [8, 9, 10, 11] で対象としている，形状が変化する柔物体への適用の際には，物体表面にとどめる God-object の位置の定義に問題が生じていると考えられる．God-object Method では，柔物体の変形状態に応じて，God-object の位置を動的に変更することは困難であることから，対話操作時の速度に基づく柔物体との相互作用のモデルとしては不十分である．

2.2.2 質点に基づく相互作用のモデル化

バネモデルによって表現された柔物体との対話操作で用いられる相互作用のモデルとして，柔物体を構成する質点が，棒状の剛体マニピュレータ内に侵入した場合，その侵入量に比例した反発力を質点に与えることにより衝突処理を行い，この時の反発力を力覚提示する方法がある [30]．この方法は質点に基づいた処理のため，物体表現に一般的に用いられるポリゴンによる衝突判定に比べ高速に行え，またマニピュレータ内に侵入する質点の個数から，マニピュレータと柔物体との接触面積に比例した力覚提示を行うことが可能である．しかし，柔物体の変形計算に依存する力覚提示であるため，一般にその提示の更新が遅くなる．また，柔物体の一部がマニピュレータに入り込んだように表示されるため，視覚的に適当でないことが報告されている [31]．また，図 3(a) に示す，速く押す対話操作における侵入量と，図 3(b) に示す，ゆっくり押す対話操作における侵入量が，その速度が異なっているにも関わらず一致してしまう問題がある．このように，マニ

表 1 柔物体の表現における有限要素法とバネモデルの関係

		有限要素法		バネモデル	
実物体の物理特性の反映		○	直接記述が可能	○	物理特性を反映する 従来研究の適用
実時間性	弾性変形	前処理や制約条件が必要 節点数に依存		質点, バネの本数に依存	
	位相変形	×	前処理や制約条件 の域を越える	質点, バネの本数に依存	

ピュレータの位置のサンプリングに依存する侵入量による反発力では，柔物体とマニピュレータの速度に基づく相互作用のモデルとしては不十分である．

また，上述の視覚的な問題を解決する方法として，質点が剛体内に侵入しないという制約条件を用い，衝突処理において，剛体内に侵入した質点を衝突面上に強制移動させ，その質点の速度を 0 とする方法がある [32]．この方法では，対話操作が行われる質点の速度が必ず 0 となるため，柔物体の変形状態や速度の異なる対話操作を反映した，衝突後の質点の速度変化を表現することは困難である．そのため，速度に基づく相互作用のモデルとしては不十分である．

2.3 本研究の位置づけと方針

本節に至るまで，柔物体との力覚提示を伴う対話操作を実現するために必要となる 2 つの要件，(1) 物理法則に基づく実時間での柔物体の挙動表現（弾性変形・位相変形），(2) 対話操作時の速度に基づく相互作用のモデル化についての従来研究を述べた．

まず，柔物体の表現方法には，有限要素法とバネモデルが代表的に挙げられ，これらの関係は表 1 のように表される．有限要素法を用いた柔物体の表現では，実物体の持つ物理特性を直接記述可能なことから，正確な柔物体の表現を行うことが可能である．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，実時間での位相変形を表現することは困難である．一方バネモデルは，物理特性

表 2 相互作用のモデルの関係

	God-object Methodによる相互作用		質点に基づく相互作用	
	衝突判定の計算	ポリゴン数に依存		○
接触面積に応じた力覚提示	×	モデル化が必要	○	接触質点の個数
力覚提示の更新	○	変形計算に非依存	×	変形計算に依存

を反映する従来法を用いて柔物体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，その変形挙動は実時間での弾性変形および位相変形が可能である．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．

次に，相互作用のモデルとしては，God-object Method と質点に基づくモデルが代表的であり，これらの関係は表2のように表せられる．質点に基づく相互作用は，God-object Method による相互作用のモデルと比べ，力覚提示の更新以外は優れていることが確認できる．また，相互作用のモデルとして，質点とマニピュレータとの衝突を，一般的な物理学における非弾性衝突として扱うことにより，速度に基づく相互作用のモデル化が可能である．

以上に述べた柔物体の表現および相互作用のモデルの考察において，バネモデルによる柔物体の表現と，質点に基づく相互作用では，双方が質点とバネの本数に依存した，柔物体の変形に要する計算量の問題を持つことが分かる．すなわち，この点を解決することができれば，2つの要件を満たす，弾性変形および位相変形の特徴を有する柔物体との，力覚提示を伴う対話操作の実現が可能であると考えられる．

そこで本研究では，バネモデルを基盤とする，少ない計算量で柔物体の表現が可能な疎密バネモデルを提案する．これは柔物体の変形の度合に応じて，運動計算に必要となる最低限のバネを選択することにより，計算量の少ない柔物体の表

現を実現する手法である．ここで，2.1.2節で述べたように，バネモデルには，変形の過渡特性や安定性に問題がある．そのため，少ない計算量で完全にバネモデルと同じ挙動が可能となっても，柔物体の表現としては問題が残る．また，一般に実時間性の要求される仮想環境において必要とされることは，精度の高い厳密なシミュレーションではなく，ユーザの視点から見たもっともらしさである [33]．そこで本研究では，実物体の持つ物理特性を反映させて柔物体を表現し，実世界に存在する柔物体らしい挙動表現をすることが可能な，計算量の少ない柔物体表現に主眼をおく．また，対話操作時の柔物体とマニピュレータとの相互作用については，質点とマニピュレータの2球の非弾性衝突として相互作用のモデル化を行う．そして，これらを用いて力覚提示を伴う対話操作システムを試作し，提案手法の有効性および妥当性を検証する．

3. バネモデルによる柔物体の表現

本章では，疎密バネモデルの基盤となる，バネモデルによる柔物体の表現について述べる．バネモデルによる柔物体の表現には，その構成要素の形状や，実物体の持つ物理特性を反映したパラメータの決定方法がある．以下 3.1 節では，本研究で用いる柔物体モデルの構成要素および特徴について述べ，3.2 節では，柔物体の運動生成法について述べる．そして，3.3 節では，物理特性を反映したパラメータの決定方法について述べる．

3.1 バネモデルの構成要素

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．

本研究では，簡単化のため，物体が均質で等方性の変形挙動をすることを仮定する．一般に，このような性質の柔物体の表現では，構成要素は，図 4 に示すように，立方体格子を利用し，その格子上の質点すべての組合せで張られる 28 本のバネのネットワークを用いて表現する．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，格子は一様な質量を持つとして各質点に等価な質量を与える．

3.2 質点の運動生成

柔物体を構成する各質点は，質点に加わる外力および重力と，質点間のバネのネットワークによって生じる応力が釣り合う時に静止する．そして，質点に加わる力の変化によってその釣り合いが崩れた時に運動する．実際の運動生成の計算処理 [12, 30, 31, 34] では，まず以下の式を用いて，質点 i にかかる力の総和 F_i を

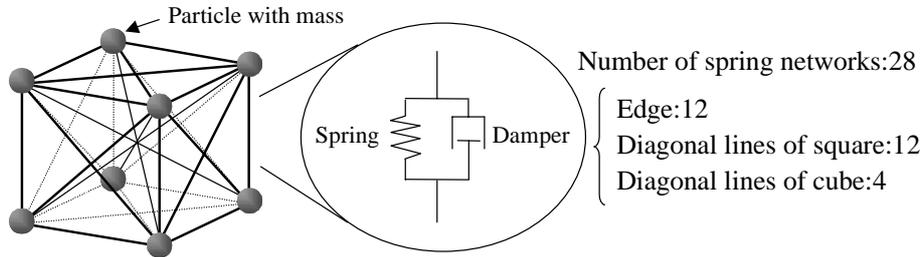


図 4 柔物体バネモデルの構成要素

求める .

$$F_i = mg - \sum_j \left\{ k \left(1 - \frac{L}{|r_{ij}|} \right) r_{ij} + D v_{ij} \right\}. \quad (2)$$

ここで m, g, L, k, D は, それぞれ質点の質量, 重力加速度, バネの自然長, バネ定数, ダンパ定数である. r_{ij}, v_{ij} は, それぞれ質点 i とバネにより接続するすべての質点 j に対する質点 i の相対位置ベクトルおよび相対速度ベクトルである.

次に, 式 (2) で求められた各質点にかかる力より, ΔT 時間後の各質点の速度ベクトル V_i および位置ベクトル R_i を, それぞれ以下の式を用いて求める.

$$V_i(T + \Delta T) = V_i(T) + \frac{F_i(T)}{m} \cdot \Delta T. \quad (3)$$

$$R_i(T + \Delta T) = R_i(T) + V_i(T) \cdot \Delta T. \quad (4)$$

以上の処理を逐次的に行うことにより, ΔT 時間毎の質点の運動生成を行う.

3.3 物理特性を反映したパラメータの決定

バネモデルで表現される柔物体の柔らかさはバネ定数によって決定され, その値は, 物理特性であるヤング率を反映して求めることができる [23]. 構成要素に立方体格子を用いた場合, ヤング率 E とバネ定数 k , および立方体格子の辺の長さ l の関係が次式で与えられる. なお, 格子を構成する全てのバネのバネ定数は同一である.

$$E \simeq 4.64 \frac{k}{l} \quad (5)$$

また，同じヤング率を持つ物体でも密度 ρ によって運動は異なる．格子の数が十分多くなれば質量は均質に分布しているとみなすことができるので，各質点の質量 m と密度 ρ ，および立方体格子の辺の長さ l の関係が次式で与えられる．

$$\rho = \frac{m}{l^3} \quad (6)$$

これらの等式を用いることにより，物理特性であるヤング率 E および密度 ρ ，そして構成要素の立方体格子の長さ l を決めれば，バネ定数 k および質量 m を一意に決定することができる．また，ダンパ定数 D は，簡単化のため一定値として与える．

4. 疎密バネモデルによる柔物体の挙動表現

柔物体の複雑な挙動を表現する際には，質点およびバネの本数を増やす必要がある．これらが増加したとき，図 5(a) に示すように，従来のバネモデルによる質点の運動計算では，全質点に接続するバネが用いられるために計算量が増加していた．そこで本研究では，図 5(b) の太線に示すように，柔物体を操作するマニピュレータに接触する質点付近，および変形の大きい箇所を密なバネモデルで計算し，変形の小さい箇所を段階的に疎なバネモデルで計算する．これにより計算に用いるバネを削減し，少ない計算量で柔物体の表現が可能な疎密バネモデルを提案する．

以下では，4.1節において，疎密バネモデルの定義とその運動生成の処理手順の概要について述べる．また，4.2節，4.3節において，疎密バネモデルによる弾性変形，そして位相変形の挙動表現方法についてそれぞれ述べる．なお，本手法は 3 次元物体を対象とするが，図は簡単化のために 2 次元的に表現する．

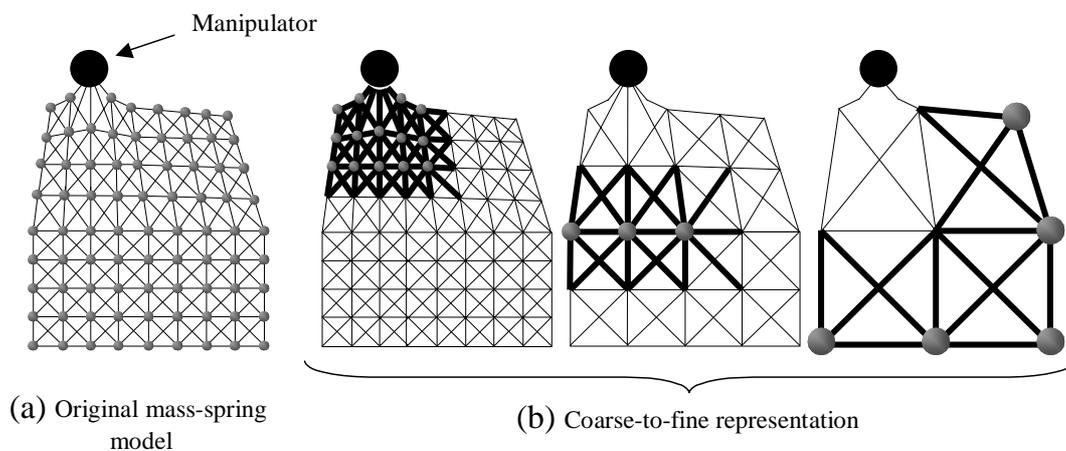


図 5 柔物体の疎密表現によるバネの選択

4.1 疎密バネモデルの定義と処理手順の概要

疎密バネモデルとは，全ての質点およびバネのネットワークで構成される従来のバネモデルを基に，段階的に疎となるバネモデルを予め用意し，そのバネモデ

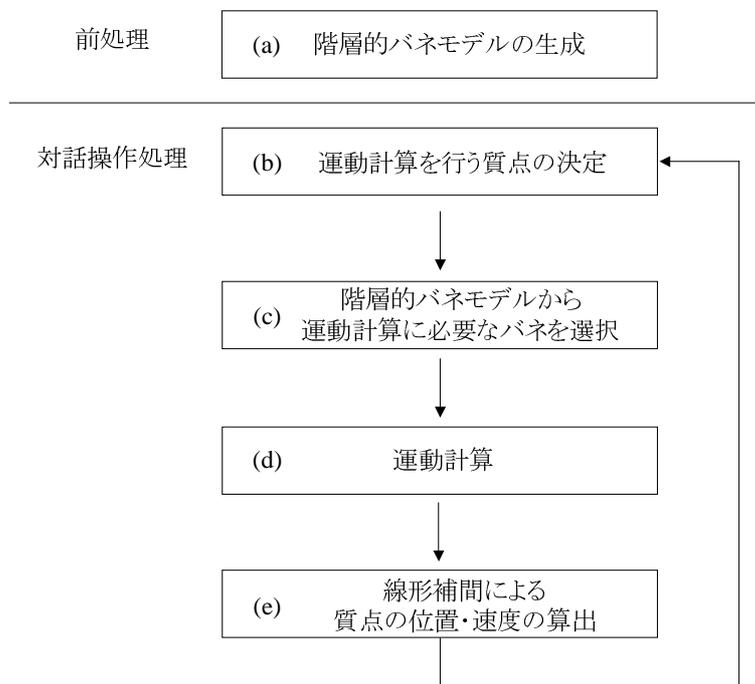


図 6 疎密バネモデルによる運動生成の処理手順

ルから柔物体の変形の度合によって、適切なバネを動的に選択することによって運動生成を行う柔物体の表現方法である。

疎密バネモデルによる運動生成の処理手順の概要を図 6 に示す。まず図 6(a) に示す前処理において、疎密表現の度合（レベル）が異なる複数のバネモデル（階層的バネモデル）を用意する。そして、実際に柔物体と対話操作を行う図 6(b) ~ (e) に示す処理では、まず、柔物体の運動生成を行うための必要最低限の質点を決定する。この決定の際には、同時に、その質点が運動生成に必要とする階層的バネモデルのレベルを求める。そして、その得られた情報に基づき、質点の運動計算に必要なバネを、階層的バネモデルから適切に選択する。そして、そのバネを用いて運動計算を行う。最後に、格子内に存在する質点の位置・速度を、格子上の既に求められている質点の位置・速度を線形補間することによって全質点の位置・速度を求める。次節では、図 6 に示した処理毎に、その具体的な内容について述べる。

4.2 疎密バネモデルによる弾性変形

(a) 階層的バネモデルの生成

まず前処理として，図 7(a) に示す，全ての質点およびバネのネットワークで構成される従来のバネモデルを基に，図 7(b) ~ (d) に示すように，この幕で段階的に疎となる階層的バネモデルを，3.3 節で述べたパラメータの決定方法を用いて用意しておく．ここで，レベル n ($n = 0 \cdots N$) の階層的バネモデルとは，従来のバネモデルの構成要素である $(2^n)^3$ 個の立方体格子を，1 つの立方体格子に結合して表現したバネモデルのことである．また，階層的バネモデルの各レベルにおける，同じ位置に存在する質点の位置・速度の値は共有されている．図 7 では，最も疎な階層的バネモデルのレベルを 3 とした．

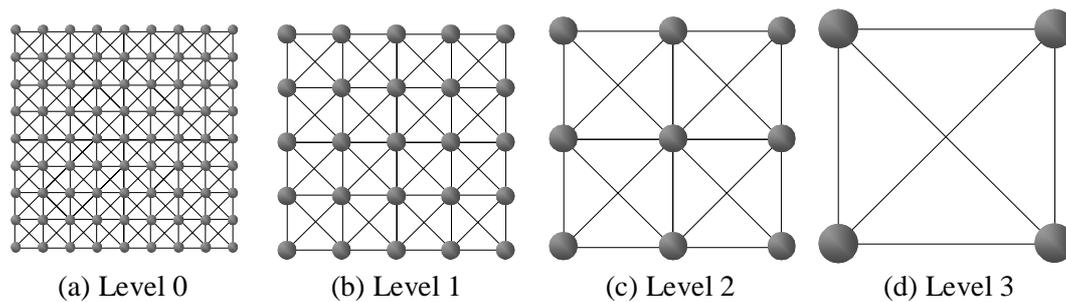


図 7 階層的バネモデル

(b) 運動計算を行う質点の決定

次に実際の対話操作において，以下の処理が動的に行われる．まず，図 8(a) に示すように，マニピュレータが質点に接触した場合に，柔物体の運動計算に必要なとなる最低限の質点の決定と，その質点が必要とする階層的バネモデルのレベルの決定が行われる．これらの決定を行う処理は，2 つの処理で構成される．1 つは接触質点が格子上に存在するようにバネモデルを分割する処理であり，他方は格子の変形の大きさに応じて再分割する処理である．これらの処理について，図 7 に示した階層的バネモデルを用いて具体的にそれぞれ述べる．

- 接触質点が格子上に存在するようにバネモデルを分割する処理

図 8(b) に示すように，最も疎なレベル 3 の階層的バネモデルから分割処理が行われる．この時，接触質点が格子上に存在していないため，図 8(c) に示すように，階層的バネモデルのレベルを 1 つ下げることによって格子を分割する．この時も，接触質点が格子上に存在していないため，図 8(d) に示すように，接触質点を内包する格子について，その階層的バネモデルのレベルをさらに下げる．これを再帰的に行うことにより，接触質点が格子上に存在するようにバネモデルを分割構成する．

- 格子の変形の大きさに応じてバネモデルを再分割する処理

図 8(d) に示す，分割構成された格子内の対角線バネの伸縮から，格子の変形が大きい場合に再分割を行う．再分割にあたっては条件式 (7) を用いて判定を行い，バネの伸縮がこの条件式を満たさない場合は，図 8(e) のように格子を再分割し，最密な階層的バネモデルのレベル 0 を上限としてこの処理を再帰的に行う．

$$TH_0 < |R_{di}(T) - R_{dj}(T)| < TH_1 \quad (7)$$

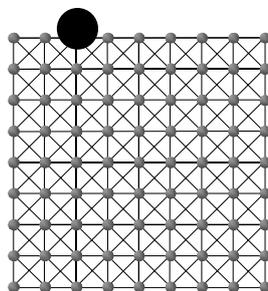
ここで， $|R_{di}(T) - R_{dj}(T)|$ は，対角線バネを構成する質点 di と質点 dj 間の時間 T における距離であり， TH_0, TH_1 は対角線バネの縮みと伸びの閾値である．

以上の処理によって，運動計算に必要最低限の質点と，その質点が運動計算に必要とする階層的バネモデルのレベルが得られる．

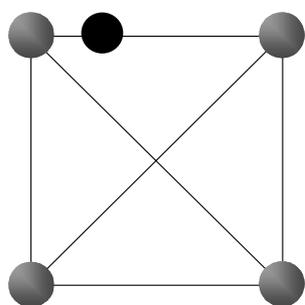
(c) 階層的バネモデルから運動計算に必要なバネを選択，(d) 運動計算

次に，質点の運動計算に必要とされるバネを，階層的バネモデルの各レベルから選択する．そして，3.2節で述べた手順により質点の運動計算を行う．これにより，図 8(d) に示す各格子上の質点の ΔT 時間後の位置・速度が求められる．

(e) 線形補間による質点の位置・速度の算出

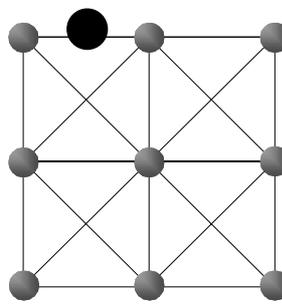


(a) Original mass-spring model



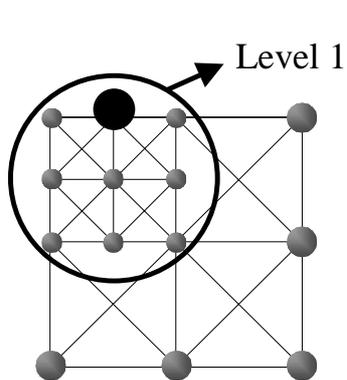
Level 3

(b)

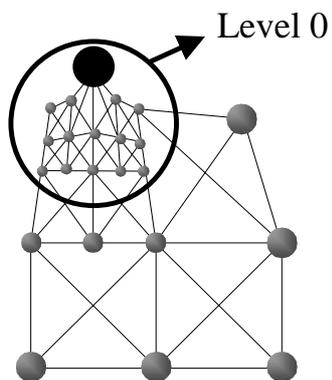


Level 2

(c)



(d)



(e)

図 8 疎密バネモデルの生成過程

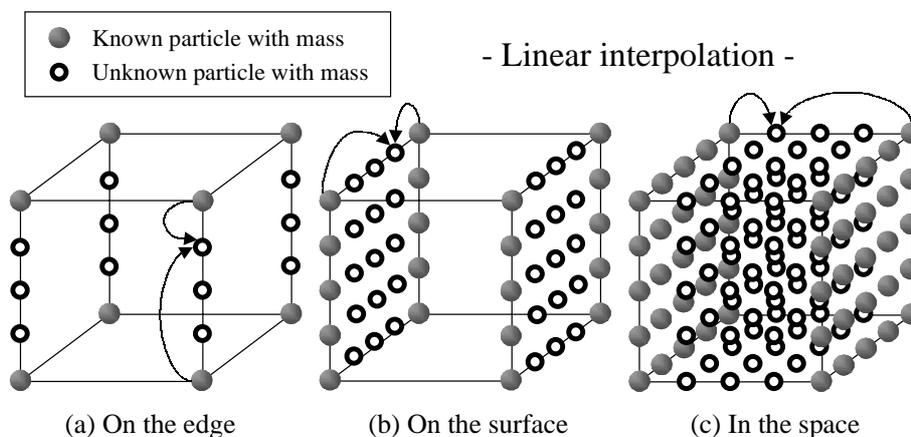


図 9 線形補間による求められていない質点の位置・速度の算出

最後に、それらの質点の値を用いて線形補間を行い、まだ求められていない格子内の質点の位置・速度を求める。ここで、レベル 2 の格子の線形補間を例にとると、図 9 に示すように、格子の 1 軸方向の稜線上、面上の順に行い、最後に内部の補間を行う。なお、処理は分割レベルの高い格子から順次行い、求められた質点については重複して計算されないようにする。ただし、最密の分割レベルの格子では補間される質点がないため補間処理は行わない。この処理を図 8(e) に示す各格子に対して行うことによって、物体を構成する全質点の位置・速度を求める。これらの一連の処理を逐次的に行うことにより、柔物体の弾性変形を表現することができる。

4.3 疎密バネモデルによる位相変形

柔物体が極度に変形した場合には、その組織が破壊され、形状が分断されるといった位相変形が生じる。本研究では、前節で述べた運動生成の方法に、文献 [34, 35] の手法を適用することによって位相変形を実現する。以下では、疎密バネモデルへの適用方法について述べる。

前節で述べた、運動計算を行う質点の決定の処理における、格子の変形の大きさに応じてバネモデルを再分割する処理において、階層的バネモデルのレベル 0

の格子について閾値処理を行う。この時、条件式 (7) を満たさない場合、格子を構成するバネを削除することによって位相変形を行う。ただし、格子の稜線および面上のバネは隣接する格子間で共有されているため、隣接格子が存在する場合はそれらのバネは削除しない。また、質点に接続する全てのバネが削除された場合は、その質点を削除する。そして、位相変形後の柔物体の密度を一定にするために、削除された質点の持つ質量を存在する全質点に均等に分配する。なお、この質量の分配処理は階層的バネモデルの各レベル毎で行う。

また、位相変形が発生した際には、運動計算を行う質点の決定の処理において、削除されたバネが接続していた質点を含む格子、または削除された質点を含む格子についても分割の対象とする。なお、格子内の全ての質点が存在しない場合には、分割の対象としない。この処理を付加することによって、弾性変形および位相変形を同時に扱える、疎密バネモデルによる挙動表現が可能となる。

5. 柔物体とマニピュレータの相互作用のモデル化

前章では，疎密バネモデルによる柔物体の挙動表現の方法を示したが，実際に柔物体との力覚提示を伴う対話操作システムを実現する為には，柔物体とマニピュレータとの相互作用のモデル化，すなわち，衝突処理および衝突時の力覚提示のモデル化が必要となる．以下では，柔物体とマニピュレータの衝突処理と対話操作時の力覚提示についてそれぞれ述べる．

5.1 衝突処理

本研究では，マニピュレータの形状を球として扱う．これは，このような単純な形状でも，ゆっくり押す，または速く押すといった，速度の異なる日常的な対話操作が可能であり，かつ衝突判定の際に計算負荷が少ない特徴を持つからである．また，柔物体とマニピュレータとの衝突を，柔物体を構成する質点とマニピュレータとの2球の非弾性衝突として扱う．これにより，仮想環境内の座標系におけるシミュレーション計算時間毎の両物体の速度に基づいた衝突処理を行う．

具体的な処理手順は，図 10(a) に示すように，マニピュレータの表面およびマニピュレータ内に質点が入った場合に，それらが衝突したとみなし，以下の式を用いて質点の衝突後の速度を求める．

$$v_1' = \frac{(m_1 - em_2)v_1 + (1 + e)m_2v_2}{m_1 + m_2} \quad (8)$$

ここで， v_1' は衝突後の質点の速度であり， v_1, v_2 は，それぞれ衝突前の質点およびマニピュレータの速度である．また m_1, m_2 は，それぞれ質点およびマニピュレータの質量であり， e は跳ね返り係数である．

次に，求められた速度を衝突した質点に与え運動計算を行う．運動計算後，図 10(b) に示すように，質点がマニピュレータ内に留まっている場合は，質点がマニピュレータの表面上で静止しているとみなし，図 10(c) に示すように，質点の速度方向のマニピュレータの表面上に質点を強制移動させ，その質点の速度を 0 とする．ただし，衝突処理は，計算量削減のため柔物体の表面に存在する質点に対してのみ行う．また，衝突処理が行われた全ての質点について，4節で述べた疎密バネモデルの分割処理が行われる．

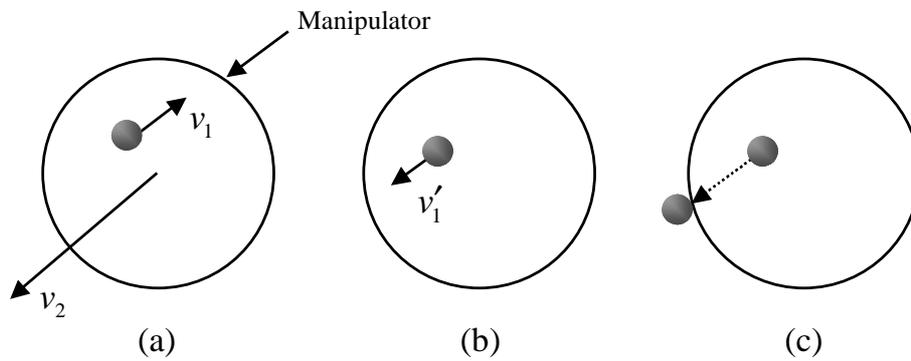


図 10 質点とマニピュレータの衝突処理

5.2 力覚提示

衝突処理が行われた質点を持つ応力の総和を，衝突時の速度および接触面積に応じた反力と考える．そして，衝突質点を持つ応力の総和を，マニピュレータへの作用力として力覚提示を行う．ただし，表現する柔物体の大きさに応じて，力覚提示装置が提示可能な値にスケーリングを行う．

しかし，すでに述べたように，本手法は質点の挙動に基づく力覚提示であるため，力覚提示の更新レートが低くなり振動が発生する問題がある．そこで，この振動を抑制するため，過去に提示した数回分の力の平均を求め力覚提示を行う．

6. 試作システムによる有効性と妥当性の検証

本章では，提案手法を用いて試作した，仮想環境下での力覚提示を伴う柔物体との対話操作システムを通して，疎密バネモデルの有効性及び相互作用のモデル化の妥当性を検証する．疎密バネモデルの有効性については，柔物体の変形計算に必要とされる計算時間を評価する．また，柔物体とマニピュレータの相互作用のモデルについては，柔らかさが異なる3つの柔物体に対し，速度の異なる対話操作を行った際の，柔物体の変形挙動と反力の違いについて考察する．以下では，6.1節において，試作した対話操作システムについて述べ，6.2節において，柔物体との対話操作の例を示す．そして6.3節，6.4節において，疎密バネモデルおよび相互作用のモデル化の有効性，妥当性についてそれぞれ検証する．

6.1 試作システム

提案手法を用いて対話操作システムを試作した．本試作システムでは，力覚提示装置を用いて，仮想環境下の球状の剛体マニピュレータを操作し，柔物体との力覚提示を伴う対話操作を行う．また，液晶シャッタ眼鏡による両眼立体視が可能である．試作システムの概観を図11に，実験に用いた機材を表3に示す．柔物体はヤング率 E を変化させることによって，その柔らかさを変化させることができ，一般にヤング率が大きいほど堅い物体となる．そこで，柔らかいプラスチックまたはゴムに相当するヤング率を基準に，そのヤング率を増減させた3つの柔物体を実験の対象とした．

柔物体とマニピュレータのパラメータを表4に示す．表中のダンパ定数は，従来のバネモデルが過渡特性の問題を生じない下限値を用いた．また，柔物体の形状は，1辺を1.0[m]とする立方体形状とし，下面の質点は床に固定されていると仮定した．階層的バネモデルの最も疎なレベルは2とした．実際にはレベル3まで疎にすることが可能であるが，上面端に存在する4つの質点以外に対話操作が行われた場合には，必ず分割処理が発生するため，対話操作時の計算量の観点から最も疎なレベルを2とした．また，条件式(7)における閾値は，経験的に決定し，表5に示す値を用いた．差分計算における離散時間間隔は，従来のバネモデ

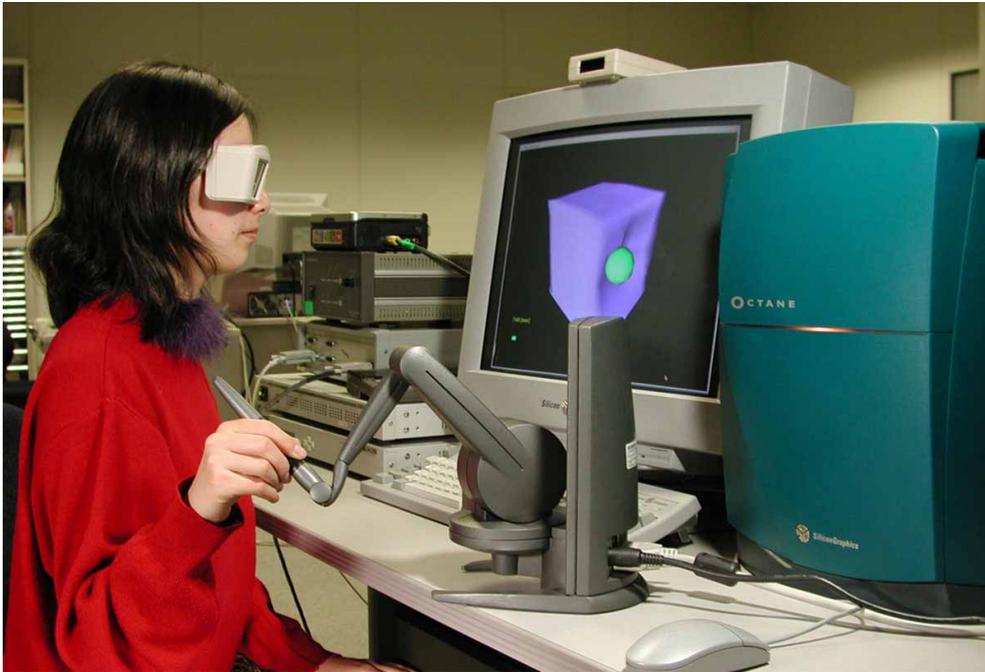


図 11 柔物体の対話操作システム

ルが振動・発散しない上限値 $\Delta T = 1.0$ [msec] とし，跳ね返り係数は $e = 0.5$ とした．力覚提示は，過去に提示した 5 回分の力との平均により平滑化を行い，その値を $1/1000$ にスケーリングした．

6.2 柔物体との対話操作の例

本節では，疎密バネモデルによって表現される柔物体の，対話操作による弾性変形および位相変形について考察する．図 12 に対話操作時の柔物体の様子を示す．図 12(c) ~ (f) は弾性変形，図 12(g) ~ (i) は位相変形の結果である．なお，この対話操作の例では，柔物体 (2) を用いた．また，図 12(a) ~ (c),(d),(g) では，柔物体を表現する疎密バネモデルの状態を確認するため，格子の稜線上のバネのみを描画した．

表現した柔物体は，図 12(a) に示すように，実際には多くのバネのネットワー

表 3 使用した機材

計算機	OCTANE: CPU:MIPS R10000 196MHz Memory:256MB	SGI 製
力覚提示装置	PHANTOM Desktop	SensAble Technologies 製
液晶シャッタ眼鏡	Crystal Eyes	STEREO GRAPHICS 製

表 4 柔物体とマニピュレータのパラメータ

柔物体 (1)	ヤング率 E [N/m^2]	0.2×10^4
柔物体 (2)		1.0×10^4
柔物体 (3)		5.0×10^4
柔物体の共通パラメータ	格子分割数	$8 \times 8 \times 8$
	密度 ρ [kg/m^3]	2.0×10^3
	ダンパ定数 D [$N/(m/s)$]	3.0
マニピュレータ	質量 [kg]	10.0
	半径 [m]	0.14

表 5 疎密バネモデル生成における格子分割の閾値

Level	TH_0 [m]	対角線バネの自然長 [m]	TH_1 [m]
2	39.0	43.3	47.6
1	10.8	21.7	32.5
0*	8.7	10.8	13.0

(*位相変形を行う場合に限る)

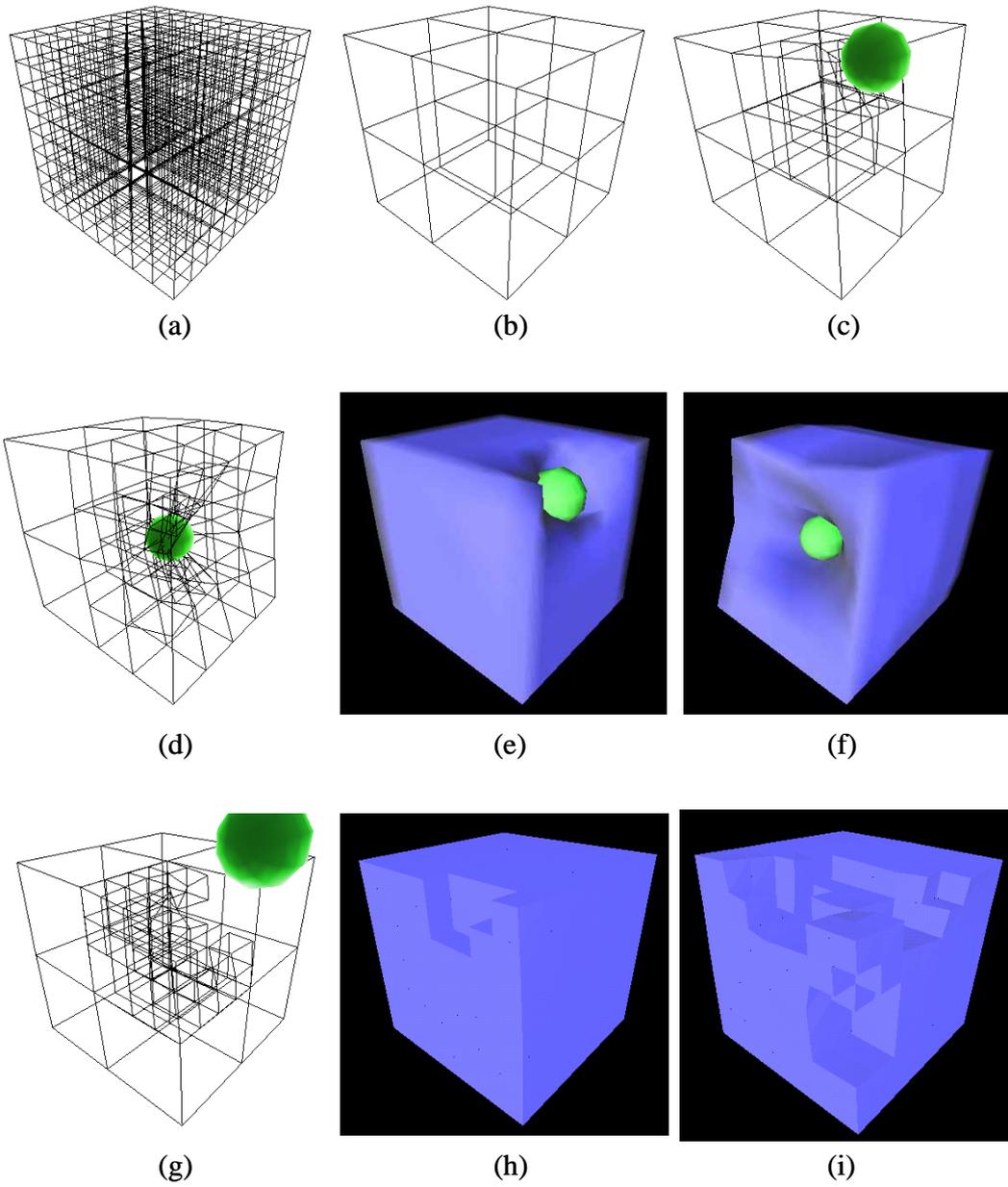


図 12 対話操作による柔物体の変形

クを有するものであるが，本手法により，図 12(b) に示すように，対話操作が行われず柔物体の変形が生じていない場合，僅かなバネだけを用いて柔物体が表現されている．また，図 12(c) に示すように，対話操作が行われた場合，マニピュレータが柔物体と接触している部分および柔物体の変形の大きい部分では密なバネモデル，変形の小さい部分では疎なバネモデルで柔物体が表現されていることが確認できる．弾性変形では，対話操作による変形の度合に応じた疎密表現が行われ，柔らかく変形する柔物体の表現が良好になされているのが確認できる．位相変形では，格子を削除する際，柔物体の表現に用いた格子数が不十分であったため，その写実性に問題が生じている．これは，写実性よりも対話操作時の実時間性を優先し，位相変形の際に計算量が少ない方法を用いたためであるが，今後この問題を改善する必要がある．

6.3 計算時間の評価

図 12(a) に示すように，質点に接続する全てのバネを用いて運動計算を行う従来のバネモデルによる柔物体の表現では，常に一定の計算時間が必要とされる．それに対し，疎密バネモデルによる柔物体の表現では，対話操作中の柔物体の変形の度合に応じて疎密表現が行われるため，その計算時間は一定ではない．

表 6 に，図 12(b) ~ (i) における，対話操作時の柔物体の表現に要したバネの本数と従来手法と提案手法の運動計算 1 サイクルあたりの計算時間を示す．図 12(b) に示す，バネ数が 158 本の最も疎な状態で約 1.2 [msec] の計算時間を要し，バネ数が約 3000 本程で，従来のバネモデルとほぼ同程度の計算時間を要した．表 6 に示した対話操作に要した時間から，従来手法に比べ少ない計算時間で柔物体の挙動表現がなされたことが確認できる．しかし，設定した離散時間間隔 $\Delta T = 1.0$ [msec] 以内の計算はできておらず，シミュレーション計算における時間と現実の時間との，厳密な一致には至っていない．ただし，その差を縮めることができ，変形操作に対する柔物体の挙動が遅いと感じられる問題が，その計算量の削減に比例して解消された．

この計算量の削減の効果について考察する．本実験において連続的に押したり突いたりする対話操作には，平均 4.1 [msec] の計算時間を要した．このことから，

表 6 1 サイクルあたりの計算時間とバネの本数の関係

		図12 (b)	図12 (c)	図12 (d)	図12 (e)	図12 (f)	図12 (g)	図12 (h)	図12 (i)
提案 手法	バネ数[本]	158	795	1599	1168	1400	1574	918	2209
	計算時間[msec]	1.2	5.7	8.2	6.6	8.6	9.2	4.9	10.2
従来 手法	バネ数[本]	7448							
	計算時間[msec]	12.5							

従来手法による対話操作と比べ、約 67.2 %の計算時間を削減できたことを確認した。また、対話操作時の描画の更新レートは約 30 [fps]、力覚提示の更新レートは約 90 [Hz] であった。力覚提示は必要とされる更新レートよりも低いものであるが、平滑化を行っているため、弾性変形において振動は概ね感じられなかった。しかし、必要とされる計算時間が従来手法と同程度になると振動が発生した。また、位相変形が生じる場合には、運動生成に要する計算時間が増加するため、位相変形が進行すると振動が発生した。

6.4 相互作用の妥当性

モデル化した柔物体とマニピュレータとの相互作用の妥当性を検証するために、図 13に示すように、マニピュレータを静止している柔物体の側面中心の手前から物体内部の中心まで等速直線運動させ、柔物体 (1) ~ (3) を用いて、その柔らかさとマニピュレータの進行速度の違いによる、柔物体の変形挙動と反力について考察する。

6.4.1 柔物体の変形挙動の考察

図 14 ~ 図 19に、視覚的な柔物体の挙動結果を示す。各図 (a),(b),(c) は、マニピュレータを柔物体に対して、それぞれ速度 1, 15, 30 [m/s] で押したものである。図 14 ~ 図 16は、マニピュレータの柔物体への侵入量に応じた柔物体の変形挙動を示し、左から、0 [m] (衝突直後)、0.05 [m]、0.1 [m]、0.15 [m]、0.2 [m]、0.35

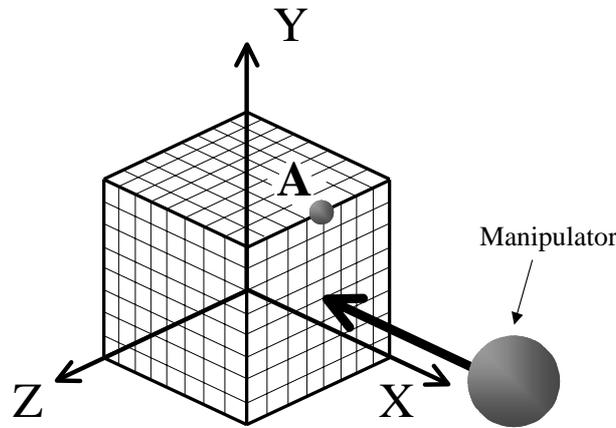


図 13 検証の概要

[m] , 0.5 [m] の侵入量毎にその変形挙動を示している．また，図 17～図 19は，マニピュレータが柔物体の中心に到着，停止後，左から，0 [msec] , 42 [msec] , 84 [msec] , 126 [msec] , 168 [msec] , 210 [msec] , 300 [msec] の時間経過後毎の変形挙動を示している．また，変形挙動の違いを定量的に示すために，慣性による変形挙動の影響を大きく受ける質点と考えられる，図 13における質点 A の衝突後の初期位置からの変位を，図 20～図 22 にマニピュレータの速度毎にそれぞれ示す．

【マニピュレータの速度と侵入量に対する柔物体の変形挙動】

図 14～図 16より考察する．各図 (a) では，押し込んでいる付近だけが変形し，その影響は柔物体全体に及んでいないのに対し，各図 (b),(c) では，押し速度に比例して，その影響が側面全体に伝播し，各図 (a) に比べ大きく変形していることが確認できる．また，各図 (a),(b),(c) の変形挙動は，その柔らかさ（ヤング率）の違いに関わらず，侵入量に対してほぼ同じ挙動であることが確認できる．

【マニピュレータが柔物体の中心に到達，停止後の柔物体の変形挙動】

図 17～図 19より考察する．各図 (a) では，ほとんど物体は変形していないことが確認できる．一方，各図 (b),(c) では，その柔らかさに比例して，変形挙動が異なっている．図 17(c) に示す，最も柔らかい柔物体 (1) の場合では，時間経

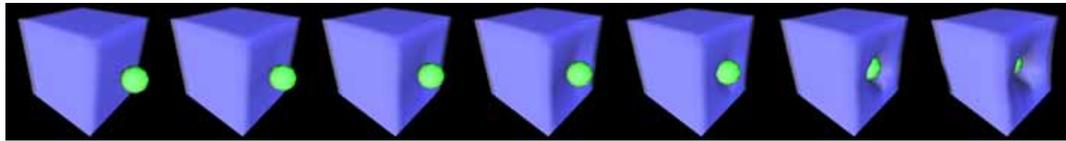
過に比例して，慣性によって全体的に大きく変形し，最右端の図においても，まだ変形を続けていることが確認できる．一方，図 19(c) に示す，最も堅い柔物体 (3) の場合では，42 [msec]，84 [msec] の時間経過後に，慣性による変形挙動を僅かながら確認できるが，126 [msec] 以降では，既に元の形状に戻り，ほとんど変形していないことが確認できる．

【衝突後の柔物体の定量的な変形挙動】

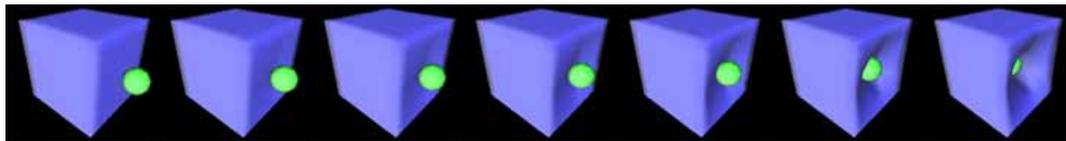
図 20～図 22より考察する．なお，図中の×印は，マニピュレータが柔物体の中心に到達し，停止した時間における質点 A の変位を示す．図 20に示す，速度 1 [m/s] でゆっくり押した場合の変形挙動は，先に述べた視覚的な変形挙動と同様に大きな差は出ていないが，僅かながら柔物体の柔らかさに比例してその挙動が大きくなっていることが確認できる．図 21，図 22に示す，より速く押した場合の変形挙動は，柔物体の柔らかさに比例してその変形が大きくなっていることが確認できる．また，図 20中の B に示す付近の，柔物体 (3) のグラフは急に下降している．これは，疎に表現されていた柔物体が，疎密バネモデルにおける格子分割が進行し，より密に表現されたことに起因する．この時のマニピュレータの進行速度が遅いと，疎密バネモデルにおける格子分割が，柔物体の変形途中で発生するため，このようなグラフの下降が発生する．しかしながら，視覚的には違和感を感じる変形挙動ではなかった．一方，図 21，図 22では，先のようなグラフの下降は認められない．これは，マニピュレータの速度が速いため，衝突後の僅かな時間で，格子分割が進行したためである．

6.4.2 マニピュレータが柔物体から受けた反力の考察

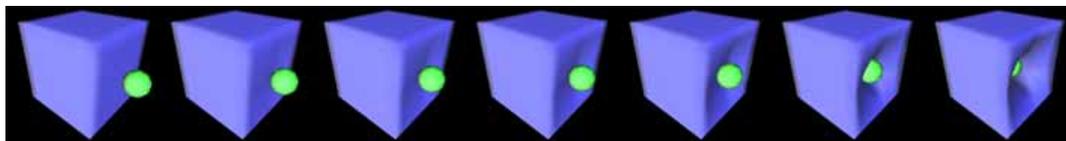
図 23～図 25に，柔物体 (1)～(3) からマニピュレータに返された反力をそれぞれ示す．なお，各図における (a) は，マニピュレータの柔物体の内部への侵入量と反力の関係を示し，(b) は，柔物体とマニピュレータの衝突後の経過時間と反力の関係を示す．また各図 (a) における●は，疎密バネモデルにおける接触質点のレベルの変化した時間を示し，実験において，0 [sec] から●までが最も疎なレベルで，それ以降が最も密なレベルで計算されていた．なお，全ての接触質点が同じレベルで構成されていた．また各図 (b) における×印は，マニピュレータが



(a) 速度 1 [m/s]

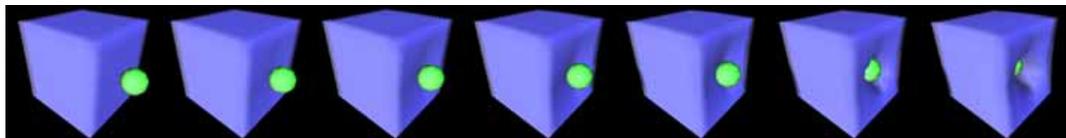


(b) 速度 15 [m/s]

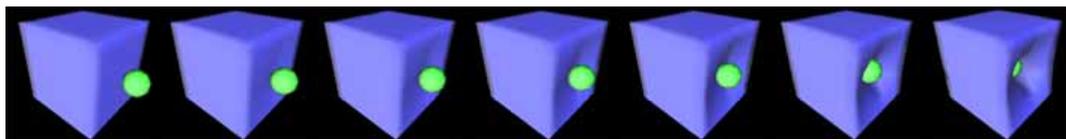


(a) 速度 30 [m/s]

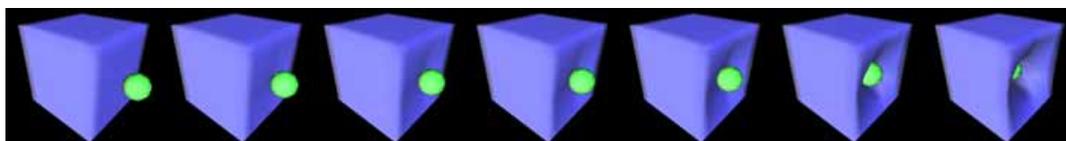
図 14 マニピュレータの侵入量と速度の違いによる挙動結果：柔物体 (1) (ヤング率 $E = 0.2 \times 10^4 [N/m^2]$)



(a) 速度 1 [m/s]



(b) 速度 15 [m/s]



(c) 速度 30 [m/s]

図 15 マニピュレータの侵入量と速度の違いによる挙動結果：柔物体 (2) (ヤング率 $E = 1.0 \times 10^4 [N/m^2]$)

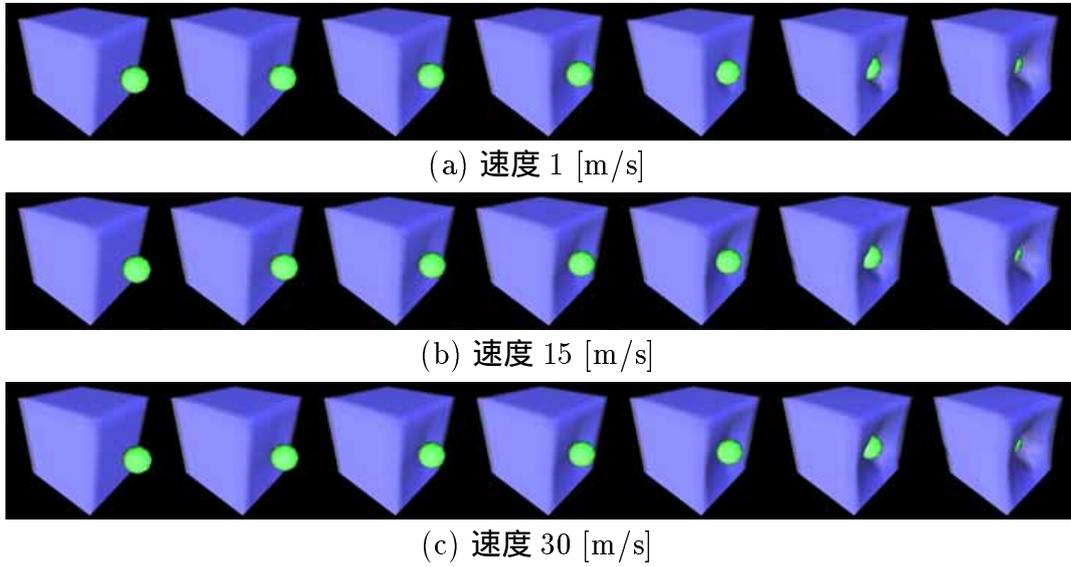


図 16 マニピュレータの侵入量と速度の違いによる挙動結果：柔物体 (3) (ヤング率 $E = 5.0 \times 10^4 [N/m^2]$)

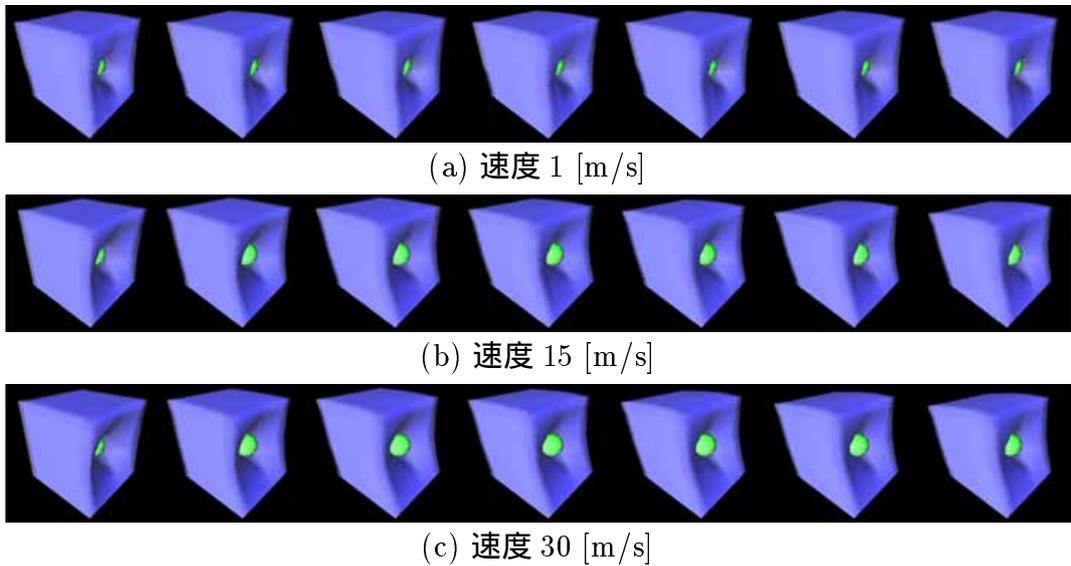
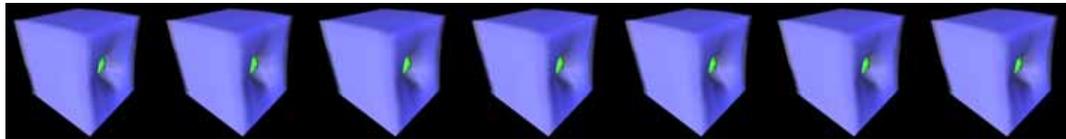
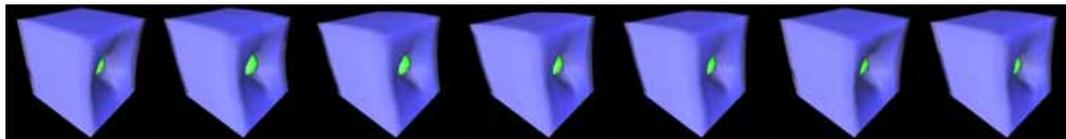


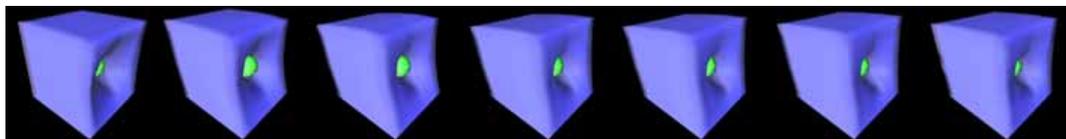
図 17 経過時間とマニピュレータの速度の違いによる挙動結果：柔物体 (1) (ヤング率 $E = 0.2 \times 10^4 [N/m^2]$)



(a) 速度 1 [m/s]

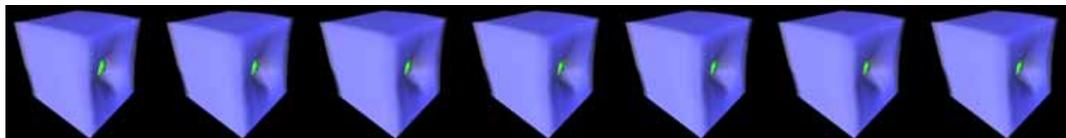


(b) 速度 15 [m/s]

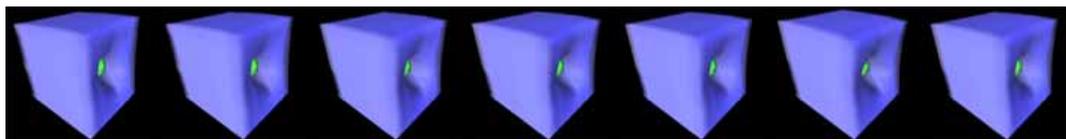


(c) 速度 30 [m/s]

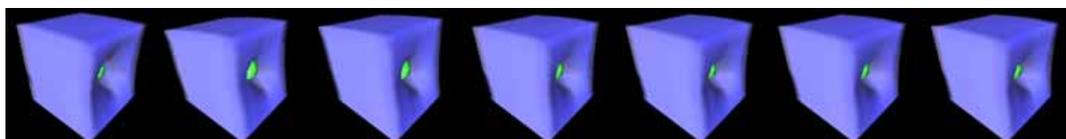
図 18 経過時間とマニピュレータの速度の違いによる挙動結果：柔物体 (2) (ヤング率 $E = 1.0 \times 10^4$ [N/m²])



(a) 速度 1 [m/s]



(b) 速度 15 [m/s]



(c) 速度 30 [m/s]

図 19 経過時間とマニピュレータの速度の違いによる挙動結果：柔物体 (3) (ヤング率 $E = 5.0 \times 10^4$ [N/m²])

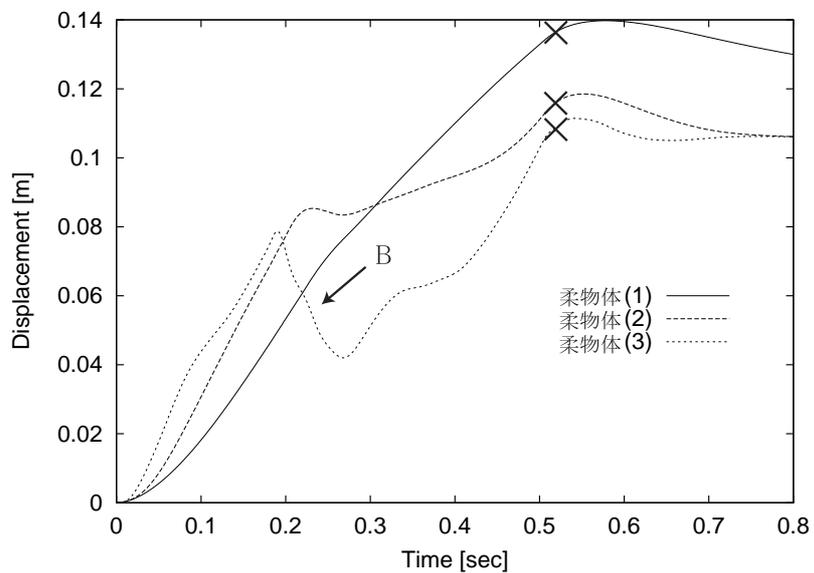


図 20 マニピュレータの速度による質点の変位の違い (速度 1 [m/s])

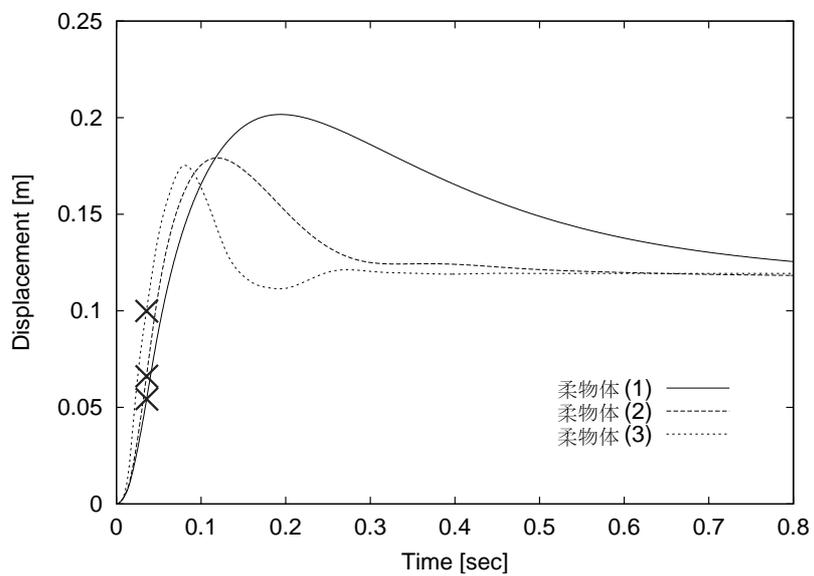


図 21 マニピュレータの速度による質点の変位の違い (速度 15 [m/s])

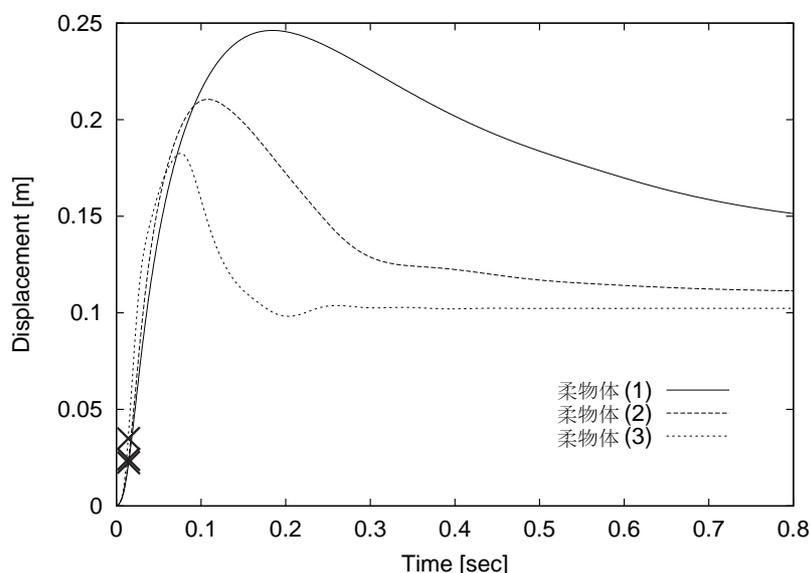


図 22 マニピュレータの速度による質点の変位の違い (速度 30 [m/s])

柔物体の中心に到達した時間における反力を示す。

【マニピュレータの侵入量に対する反力】

各図 (a) より，侵入量に比例して概ね反力が大きくなっていることが確認できる．また，速度および柔物体の堅さに比例して，反力が大きくなっていることが確認できる．しかし，各図 (a) 中の D に示す付近の 1 [m/s], 15 [m/s] のグラフでは，侵入量が増えても下降したグラフとなっている．これは，疎密バネモデルにおける接触質点のレベルが変化したためである．接触質点のレベルが，疎なレベルから密なレベルに変化すると，接触質点の持つ応力が減少するために，このような結果となった．

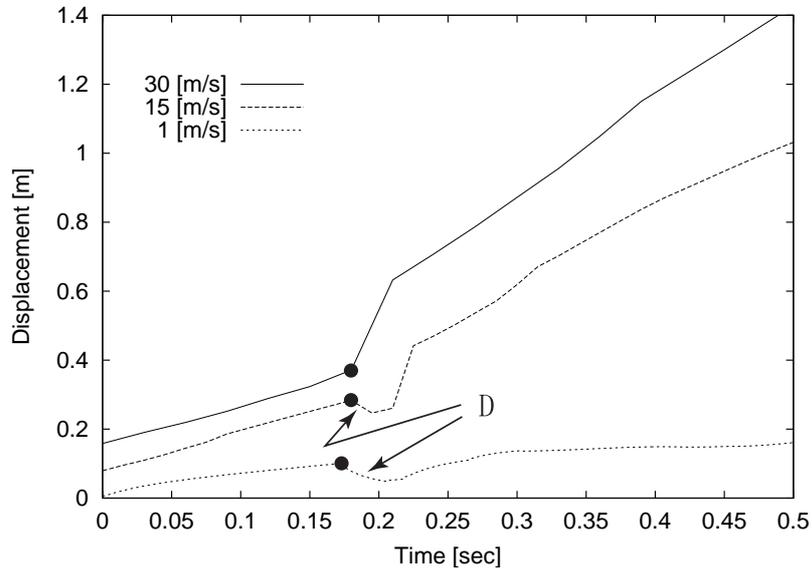
【経過時間に対する反力】

各図 (b) より，押す速度が速い程，柔物体の中心に到達する時間が早くなるため，これに比例して反力が大きくなっていることが確認できる．また，マニピュレータが柔物体の内部中心で停止するため，停止後，時間が経過すると，ほぼ一

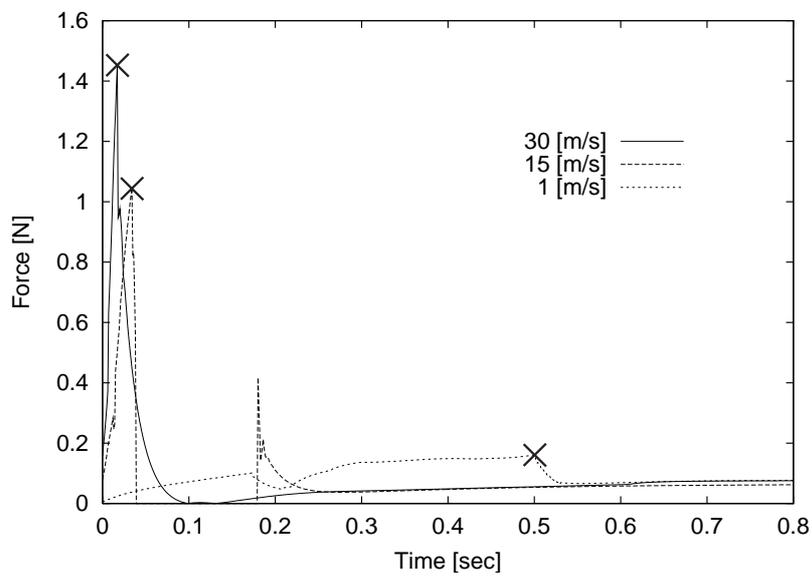
定の反力が返されていることが確認できる。

6.4.3 まとめ

本節で行った相互作用の実験における変形挙動，反力の考察をまとめる．変形挙動においては，柔物体の柔らかさおよびマニピュレータの速度に応じた柔物体の変形挙動の違いが確認された．その結果は，視覚的に実世界に存在する柔物体らしい変形挙動を再現する結果であった．一方反力については，概ね実世界の現象と同じように，マニピュレータの変化に比例した反力を得ることができた．しかし，疎密バネモデルにおける接触質点のレベルが変化する際に，その質点を持つ応力が減少するため，侵入量が増加しているにも関わらず反力が減少する問題が確認された．以下に，この問題について考察する．疎密バネモデルは，閾値処理によって格子の再分割を行い，変形の度合に応じた柔物体の表現を行う．本実験では，この閾値を経験的に決定し定数として扱ったが，これを変化させることにより，疎密バネモデルにおける接触質点のレベルが変化する際に反力が減少することのない，より現実に近い結果が得られると考えられる．しかし，この閾値の決定には，運動生成に要する計算時間とのトレードオフの関係があるため，今後この問題について検討していく必要がある．

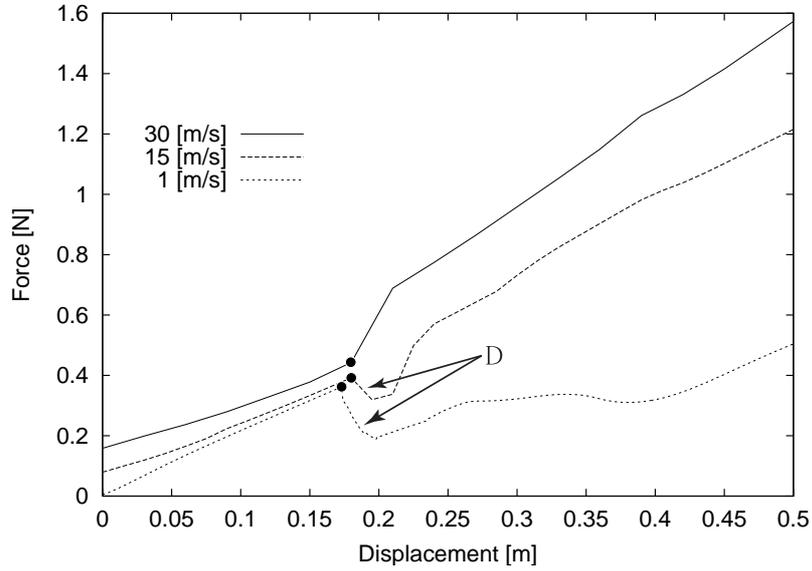


(a) マニピュレータの侵入量と反力の関係

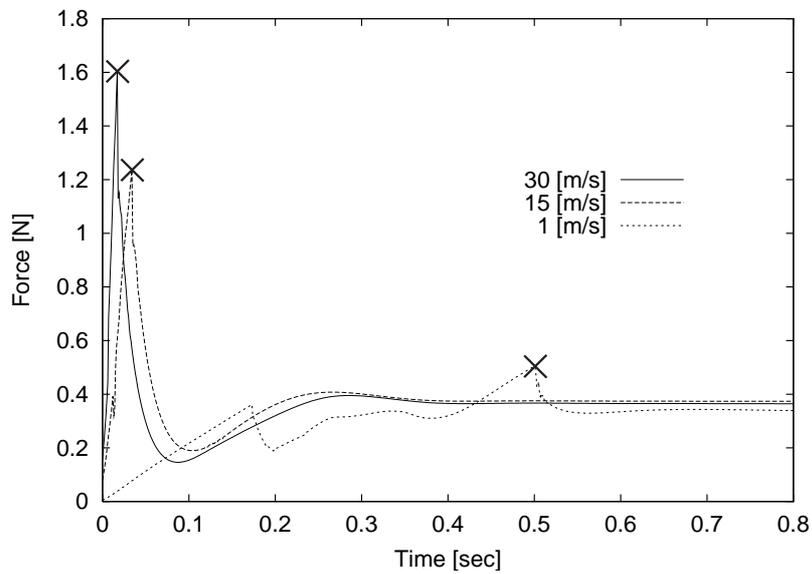


(b) 衝突後の経過時間と反力の関係

図 23 マニピュレータの速度による反力の違い: 柔物体 (1) (ヤング率 $E = 0.2 \times 10^4$ [N/m^2])

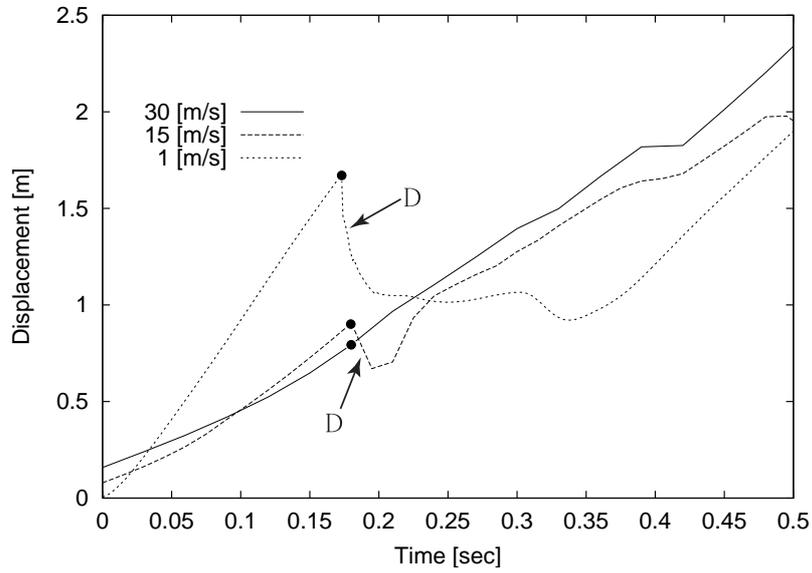


(a) マニピュレータの侵入量と反力の関係

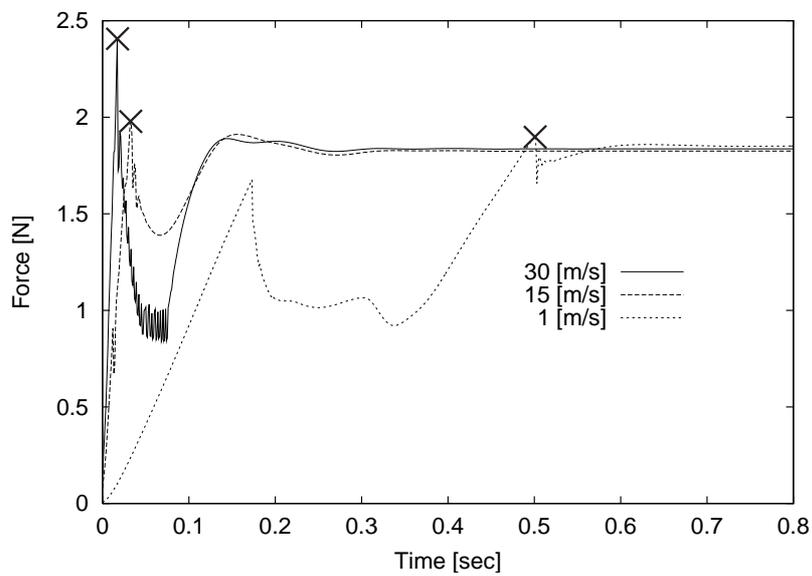


(b) 衝突後の経過時間と反力の関係

図 24 マニピュレータの速度による反力の違い: 柔物体 (2) (ヤング率 $E = 1.0 \times 10^4$ [N/m^2])



(a) マニピュレータの侵入量と反力の関係



(b) 衝突後の経過時間と反力の関係

図 25 マニピュレータの速度による反力の違い: 柔物体 (3) (ヤング率 $E = 5.0 \times 10^4$ [N/m^2])

7. おわりに

本論文では、弾性変形および位相変形が表現可能な柔物体との力覚提示を伴う対話操作の実現について述べた。この実現に必要な要件として、(1) 物理法則に基づく実時間での柔物体の挙動表現、(2) 対話操作時の速度に基づく相互作用のモデル化の2つを挙げ、これらを満たすための提案手法をそれぞれ示した。前者に対しては、柔物体の表現に一般的に用いられているバネモデルを基盤とする、少ない計算量で柔物体の挙動表現が可能な疎密バネモデルを提案した。後者に対しては、柔物体を構成する質点と球状の剛体マニピュレータの2球の非弾性衝突として扱うことにより、速度に基づく相互作用のモデル化を提案した。そして、これらの提案手法を用いて対話操作システムを試作し、本手法の有効性と妥当性について検証した。

疎密バネモデルによる柔物体との対話操作では、その計算量の削減の効果により、従来変形操作に対する柔物体の挙動が遅く感じられていた問題を、その削減量に比例して解決することができた。そして、弾性変形において、概ね良好な力覚提示を伴う対話操作が可能であった。しかし、位相変形を含む対話操作では、格子数に依存する写実性の問題や、変形が進行すると多くの計算量が必要となり、力覚提示において振動が発生するという問題があった。

相互作用の妥当性の検証では、速度の違う対話操作による、柔らかさの異なる柔物体の変形挙動について、視覚的に実世界に存在する柔物体らしい変形挙動を再現できたことを確認した。また、反力については、実世界の現象を概ね再現する結果であった。しかし、疎密バネモデルにおける接触質点のレベルが変化する際に、速度の遅い対話操作であるほど、マニピュレータの侵入量が増加しているにも関わらず反力が減少するという実世界の現象と異なる結果となった。

今後の課題として、提案手法の複雑な形状への適用が挙げられる。本論文では柔物体の形状を、最も計算量が削減できる立方体形状としたが、複雑な形状に適用する際には、柔物体の表面が常に密なバネモデルで表現されるため計算量が増加する。また、位相変形が生じ、形状が複雑になる際にも同様の問題が生じる。そのため、複雑な形状や写実性の高い位相変形を実現するには、その際の計算量の増加を抑制することに特化した手法の開発が必要である。

謝辞

本研究の全過程を通して，懇切なる御指導，御鞭撻を賜わった，ソフトウェア基礎講座 横矢 直和 教授に心より感謝の意を表します．

本研究の遂行にあたり，有益な御助言を賜わった，像情報処理学講座 千原 國宏 教授に厚く御礼申し上げます．

本研究の全過程を通して，懇切丁寧なる御指導，御鞭撻を賜わった，ソフトウェア基礎講座 竹村 治雄 助教授に心より感謝の意を表します．

本研究を通して，日頃より有益な御助言，御指導を頂いたソフトウェア基礎講座 山澤 一誠 助手に深く感謝致します．

物心両面において常に暖かい御支援を頂いたソフトウェア基礎講座 博士後期課程の 松宮 雅俊 氏，佐藤 哲 氏，神原 誠之 氏，ならびにソフトウェア基礎講座の諸氏に厚く御礼申し上げます．

日頃より暖かく支えて下さったソフトウェア基礎講座 事務補佐員 福永 博美 女史，ならびに 北川 知代 女史に心より感謝致します．

最後に，常日頃から私の心身を気遣っていただき，研究生活を支えてくださった両親と姉に心より感謝致します．

参考文献

- [1] 広瀬通孝: バーチャル・リアリティー, 産業図書, 1993.
- [2] H. Iwata: “Artificial Reality with Force-feedback: Development of Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator,” *Computer Graphics*, Vol.24, No.4, pp.165–170, 1990.
- [3] 佐藤誠, 平田幸広, 川原田弘: “空間インターフェース装置 SPIDAR の提案”, *電子情報処理学会論文誌 D-II*, Vol.J74-D-II, No.7, pp.887–894, 1991.
- [4] Z. Huang, R. Boulic, N. M. Thalmann and D. Thalmann: “A Multi-sensor Approach for Grasping and 3D Interaction,” R. Earnshaw and J. Vince (Eds.), *Computer Graphics: Developments in Virtual Environments*, Academic Press, pp.235–254, 1995.
- [5] H. Hoshino, R. Hirata, T. Maeda and S. Tachi: “A Construction Method of Virtual Haptic Space (II) – A Shape Model of an Object in Virtual Environment Suitable for Representing Shape with Surfaces and Edges –,” *Proc. Int. Conf. ICAT/VRST '95*, pp.211–220, 1995.
- [6] 舟橋健司, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: “3次元仮想空間における仮想手による物体操作モデルと一実現法”, *電子情報通信学会論文誌 D-II*, Vol.J81-D-II, No.5, pp.822–831, 1998.
- [7] 日下志友彦, 正城敏博, 北村喜文, 岸野文朗: “仮想環境における手–道具–物体間のインタラクションを考慮した物体操作”, *計測自動制御学会: ヒューマンインタフェース部会 N&R*, Vol.13, No.2, pp.157–164, 1998.
- [8] 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.
- [9] S. Cotin, H. Delingette and N. Ayache: “Real-Time Elastic Deformations of

Soft Tissues for Surgery Simulation,” IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics, Vol. 5, No. 1, pp.62–73, 1999.

- [10] 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.
- [11] 溝瀨友樹, 広田光一, 金子豊久: “顔部変形モデルの生成と実測に基づく力覚の再現”, 日本バーチャルリアリティ学会第 4 回大会論文集, Vol.4, pp.85–88, 1999.
- [12] 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.
- [13] C. B. Zilles and J. K. Salisbury: “A Constraint-based God-object Method For Haptic Display,” IROS '95, pp.145–151, 1995.
- [14] M. Moore and J. Wilhelms: “Collision Detection and Response for Computer Animation,” Computer Graphics, Vol.22, No.4, pp289–298, 1988.
- [15] D. Baraff: “Analytical Methods for Dynamic Simulation of Non-penetrating Rigid Bodies,” Computer Graphics, Vol.23, No.3, pp223–232, 1989.
- [16] D. Baraff: “Fast Contact Computation for Non-Penetrating Rigid Bodies,” Proc. ACM SIGGRAPH '94, pp23–34, 1994.
- [17] 武田捷一, 丸山稔, 亀井克之: “物理法則に基づく剛体運動のシミュレーション手法”, 電子情報処理学会論文誌 D-II, Vol.J79-D-II, No.5, pp860–869, 1996.
- [18] D. Baraff and A. Witkin: “Dynamic Simulation of Non-penetrating Flexible Bodies,” Proc. ACM SIGGRAPH '92, pp303–308, 1992.

- [19] 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”, 日本バーチャルリアリティ学会第5回大会論文集, Vol.5, pp.229–232, 2000.
- [20] 河合裕文, 松宮雅俊, 竹村治雄, 横矢直和: “疎密バネモデルを用いた柔物体の仮想環境下での視覚および力覚提示手法の提案”, 電子情報通信学会技術研究報告 画像工学, Vol.100, No.605, pp.71–76, 2001.
- [21] 三好俊郎: 有限要素法入門, 培風館, 1994.
- [22] J. F. O'Brien and J. K. Hodgins: “Graphical Modeling and Animation of Brittle Fracture,” Proc. ACM SIGGRAPH '99, pp.137–146, 1999.
- [23] 広田光一, 高橋英嗣, 金子豊久, 関口高三, 森山紀之: “手術シミュレーションのための柔らかい臓器のモデルと操作環境”, Medical Imaging Technology, Vol.16, No.1, pp.31–41, 1998.
- [24] 加藤学, 坂本雄児, 高橋宏卓: “変形操作を目的としたボリウムデータに基づく仮想物体モデルの生成・再構成法”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J83-D-II, No.12, pp.2822–2829, 2000.
- [25] 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集, Vol.34, No.3, pp.232–238, 1998.
- [26] 一松信: 数学とコンピュータ, 共立出版, 1995.
- [27] 田中厚子, 広田光一, 金子豊久: “力覚表現を考慮した仮想物体の変形手法”, 情報処理学会論文誌, Vol.39, No.8, pp.2485–2493, 1998.
- [28] D. Baraff and A. Witkin: “Large Steps in Cloth Simulation,” Proc. ACM SIGGRAPH '98, pp.267–274, 1998.
- [29] G. Burdea: Force and Touch Feedback for Virtual Reality, John Wiley & Sons, New York, 1996.

- [30] 宮崎慎也, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: “仮想弾性物体の対話操作のためのモデル化と実現”, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J79-A, No.11, pp.1919–1926, 1996.
- [31] 宮崎慎也, 吉田俊介, 安田孝美, 横井茂樹: “局所形状保持に基づく仮想弾性物体モデルの提案”, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J82-A, No.7, pp.1148–1155, 1999.
- [32] 石黒正雄, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: “コンピュータ・グラフィックスにおける弾性物体の衝突を扱う運動モデルの検討”, 電子情報通信学会技術研究報告 パターン認識・理解, Vol.93, No. 520, pp89–96, 1994.
- [33] 舘暲, 広瀬通孝: VR 世界の構成手法, 培風館, 2000.
- [34] 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.
- [35] M. Holton and S. Alexander: “Soft Cellular Modelling: 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.