

報告番号 甲 第 3462 号

仮想空間における非剛体物体に  
対する対話操作に関する研究

宮 崎 慎 也

①

目次

仮想空間における非剛体物体に  
対する対話操作に関する研究

宮崎 慎也

## 目次

第一章 まえがき .....	1
1.1 バーチャル・リアリティの研究課題 .....	1
1.2 関連する研究の動向 .....	2
1.3 本論文の構成 .....	4
第二章 折り紙シミュレーションシステム .....	8
2.1 まえがき .....	8
2.2 システムの概要 .....	9
2.3 「折り」操作の定義と対話的実行 .....	10
2.3.1 折り操作の種類 .....	10
2.3.2 マウス入力による基本操作 .....	13
2.3.3 頂点位置の自動補正 .....	15
2.3.4 テクスチャマッピング .....	16
2.3.5 視点の移動 .....	17
2.4 折り紙の幾何学モデル .....	17
2.4.1 折れ線及び折り曲げ角度の決定 .....	18
2.4.2 データ構造 .....	18
2.4.3 面の分類 .....	22
2.4.4 リストの更新 .....	24
2.5 折り紙の物理モデル .....	26
2.5.1 曲面形状の限定 .....	26
2.5.2 曲面形状の表現 .....	28
2.5.3 エネルギー関数を用いた断面形状の決定 .....	29
2.5.4 既存のデータ構造へのリンク .....	31
2.6 システムの実現と評価 .....	32
2.6.1 システムの実現 .....	32

2.6.2 インタラクティビティ .....	35
2.7 むすび .....	38
<b>第三章 弾性物体操作シミュレーションシステム .....</b>	<b>40</b>
3.1 まえがき .....	40
3.2 システムの概要 .....	42
3.3 仮想環境のモデル .....	43
3.3.1 マニピュレータの定義と制御方法 .....	43
3.3.2 弾性物体の構造モデルと動的シミュレーション .....	45
3.3.3 衝突判定と跳ね返りのモデル .....	48
3.3.4 仮想環境の設定 .....	52
3.4 弾性モデルの改善 .....	52
3.4.1 線形特性をもつバネの振動発散の問題 .....	52
3.4.2 剛性をもつバネモデル .....	55
3.4.3 剛性と弾性の比率 .....	55
3.4.4 シミュレーションにおける実現方法 .....	56
3.4.5 エネルギー .....	60
3.4.6 2Dおよび3Dへの拡張 .....	63
3.5 システムの実現と評価 .....	63
3.5.1 システムの実現 .....	63
3.5.2 実時間処理のためのパラメータ設定 .....	64
3.6 むすび .....	70
<b>第四章 むすび .....</b>	<b>72</b>
4.1 研究成果の要約 .....	72
4.2 今後の課題 .....	73
謝辞 .....	75

# 第一章 まえがき

## 1.1 バーチャル・リアリティの研究課題

近年、計算機の演算能力並びにグラフィックスの生成能力が急速に進歩するに伴い、コンピュータグラフィックス (CG) を利用したヒューマンマシンコミュニケーションの新たな可能性が注目されるようになった。複雑な物体の形状や動きを表現するためのCGモデルを高速に計算する高性能プロセッサ、シェーディングやテクスチャマッピング等の高価なレンダリング処理をリアルタイムで実現するグラフィックスエンジンは、高品質のCG映像に対するインタラクティブな操作を実現可能にした。それと共に、計算機内に仮想的に構築された3次元世界に我々が入り込み、様々な行動を疑似的に体験できるという仮想現実 (VR = Virtual reality) の技術が現実味を帯び、様々なアプリケーションが模索されるようになった<sup>1-5</sup>。VRは実世界において危険な行為でさえ安全に体験することを可能とする技術であるため、医療を初めとする様々な分野への応用が期待されている。

実世界に存在する様々な物体を計算機が人工的に作り出す世界の中に再現し、それらをあたかも実物であるかのように操作できる仮想環境を実現することはVR研究の主要な目的の一つである。仮想の3次元空間を現実的な感覚で操作するためには、入力操作に応じて仮想世界の状態を実時間で計算し出力する一連の対話的手順を計算機シミュレーションにより実現する必要がある。すなわちデバイス入力による物体への操作を正しく判別し、それに対する仮想物体の応答を、あらかじめプログラムにより設定しておいた仮想物体間の作用・反作用に関する法則に基づいて生成する機構を実現しなければならない。また、実世界の物体の物理的性質をすべて忠実に再現することは困難である上に、現在の計算機の能力はそれらを実時間で処理するには十分ではないので、計算コストを押さえ、かつ要求された仮想物体の性質を損なわない範囲で、ある程度単純化したシミュレーションのための仮想物体モデルを考案することが重要となってくる。従来のVRの研究ではハードウェアデバ

イスの開発に研究の主眼が置かれており、剛体のみにより構成される単純な仮想世界に対する操作が実現されているだけで、これらの諸問題に十分に踏み込んだ研究は過去において報告されていない。

## 1.2 関連する研究の動向

仮想現実とは人体の位置や動きを計測できるデバイスとリアルタイムCGの生成技術を結合することにより実現されるが、その開発は図1-1に示すように入出力デバイス、仮想世界を表現するモデル、およびそれらをリンクするための操作手順アルゴリズム、の主に3つの部分から構成される。

このうち、人体と直接接触して様々なコミュニケーションを行うためのハードウェア機構に相当する入出力デバイスの開発は、VRシステム実現のためのキーテクノロジーとして重要視され、早くから研究が進められてきた。計算機との対話を人間の自然な動作において実現するために、人体の位置や動きを十分な精度で計測するための3D(3次元)センサや、人間が外界から受ける五感情報を人工的に作り出す立体表示や力覚フィードバックなどの装置が開発され、それらの精度や使いやすさに研究の主眼が置かれた<sup>6-15</sup>。入力デバイスに関する研究の主なものとしては、データグローブ等の商用のものに加えて<sup>1-5</sup>、島田らの曲面上の点の座標を精度よく入力する方法<sup>6</sup>や岩田らのデスクトップマニピュレータを利用した手の状態の入力装置<sup>7</sup>、佐藤らのストリングを用いた3次元座標の入力方法<sup>8</sup>、中村らのビームカーソルを用いた方法<sup>9</sup>などがあげられる。また、入力デバイスの性能評価に関する研究として、Wareらの3次元マウスを従来の2次元マウスに基づいた方法と入力の快適さや正確さを比較したもの<sup>10</sup>やSturmanらのグローブ型入力デバイスの比較評価を行ったもの<sup>11</sup>などがあげられる。力覚フィードバックに関する研究としては岩田らのデスクトップマニピュレータによる反力の生成方法<sup>6</sup>や福井らの曲面のなぞり感覚を対象としたもの<sup>12</sup>、井野らの力覚の心理的実験<sup>13</sup>などがあげられる。また館らはVRを遠隔操作という観点からとらえて研究を進めている<sup>14</sup>。Galyeanらは佐藤らと同様の原理による入力デバイスを開発すると共にこれを彫刻システムとして実現している<sup>15</sup>。しかしながらこれらの研究において、ソフトウェアによって実現される仮想世界のモデルや操作アルゴリズムの部分は、剛体で近似

された物体同士の衝突判定や跳ね返りモデルによる単純な世界やデータの単純な変更による塑性素材の切削加工の操作等が実現されているだけで、システム全体のレベルはまだ基礎段階にあると言わざるを得ない。

これに対し、アニメーションの分野では実世界の比較的複雑な現象を正確にシミュレーションしようと試みた例は数多く報告されている。Norton らの弾性モデルによる物体の粉碎現象の実現<sup>16</sup>やCarignan らの人体に衣服をフィットさせる方法<sup>17</sup>、Breen らの繊維のもつ物理的特性に基づいた布のモデルの生成<sup>18</sup>等はその代

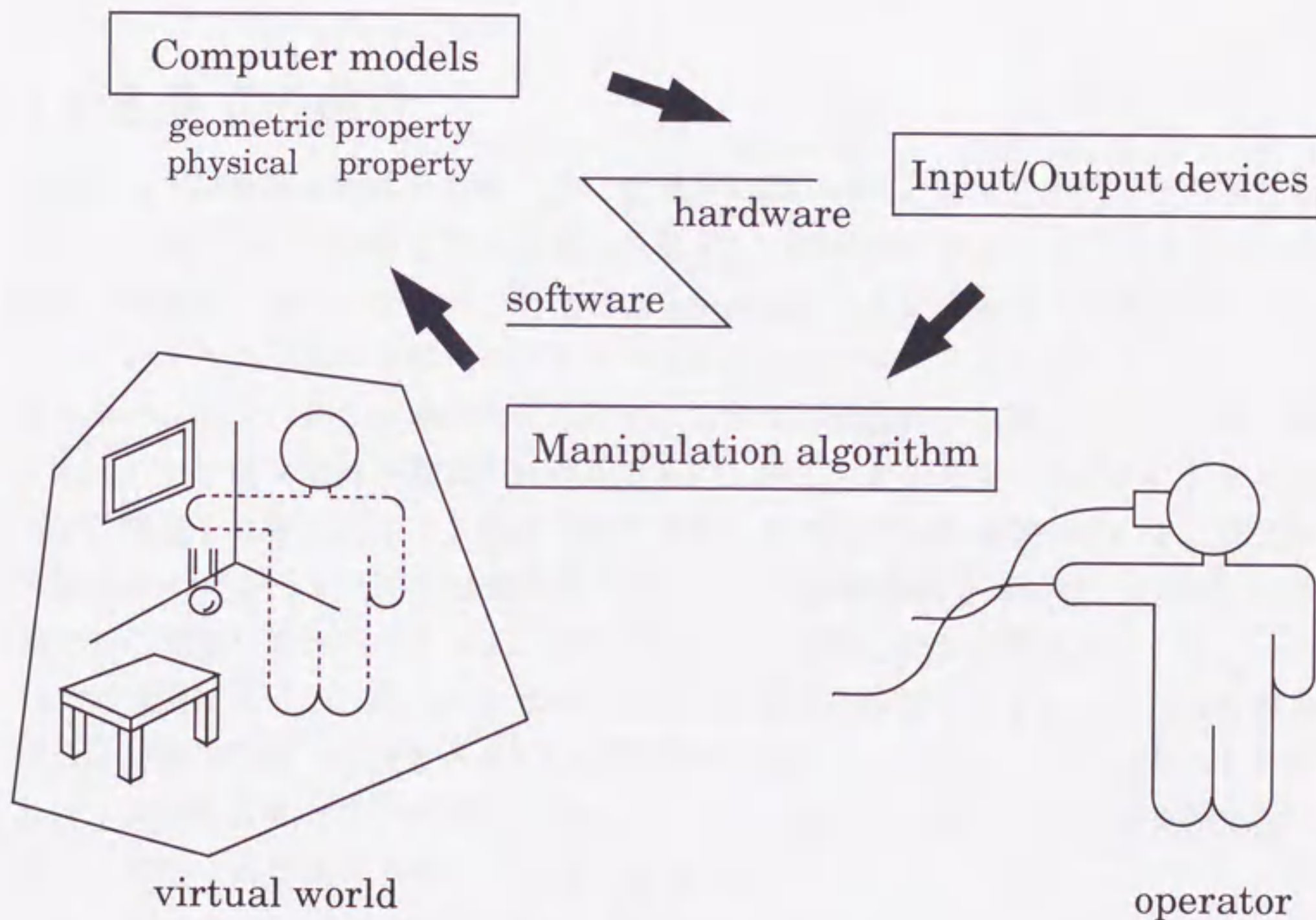


Fig. 1-1 Development of virtual reality systems.

図1-1 仮想現実感システムの開発

表的なものとしてあげられよう。しかしながら、それらのモデルは膨大な計算時間を必要としリアルタイムの対話操作システムへ応用するのは現実的ではない。そこには必要な性質を表現するためのモデルの複雑化とリアルタイム処理のためのモデルの単純化のトレードオフの問題が存在する。また、対話操作を伴うシステムでは単なるアニメーション生成の場合に比べてかなり多くのシチュエーションを考慮してシステムを設計しなければならない。これらがVRのソフトウェア面での開発が遅れている主な理由と考えられる。しかし今後、実用的なVRのアプリケーションを実現していく上では、弾性、粘性などが考慮された非剛体物体をも表現できる複雑なモデルに対する様々な対話操作を実現していかなければならない。

### 1.3 本論文の構成

本論文では非剛体物体を対象とした仮想空間操作の例として、多重に折れ重なるという性質をもつ平面素材である紙を対象とした折り紙のシミュレーションシステムと、物理学に基づいて物体の形状と動きが決定される弾性物体の対話操作シミュレーションシステムの実現について述べる。これらのシステムではリアルタイムシミュレーションにより非剛体物体に対する自由な対話操作を実現している。折り紙シミュレーションでは多重に折れ重なるという紙の性質を表現するために、その幾何学的構造を2分木のリスト構造に当てはめた紙のモデルを提案している。弾性物体操作シミュレーションでは弾性物体が本来もつ物理法則を単純化した質点-バネモデルの動的シミュレーションにより弾性物体の形状と動きを表現している。これらの実現例は古くから用いられている幾何学的構造を模倣する手法と最近の計算機の飛躍的進歩に伴って注目されている物理学に基づいた手法という、現在のCGにおける典型的なモデリング手法をふまえたものであり、今後のVRの研究の発展に大きく寄与するであろうことが期待できる。

第二章では、紙のもつ幾何学性質に基づいたモデリングにより対話システムを実現した例として、3次元の仮想空間に存在する紙に対する自由な操作を実現した折り紙のシミュレーションシステムについて議論する。ここでは、インタラクティブ操作に応じて折り紙の状態を高速に変更するために、多重に折り重なる折り紙の



面の重なりや辺の接続の関係等を2分木のリスト構造により記述する方法や、紙の曲げに対する応力を模倣した比較的単純な物理法則に基づいて紙の自然な丸みの形状を得る方法等について述べる。また、デバイスから得られる精度の低い入力データをもとに、高精度の操作を実現するためのソフトウェアによる工夫についても述べる。

第三章では実世界に存在する様々な物理的性質のうちから「弾性」をとりあげ、質点とバネの組み合わせにより構成される弾性物体モデルに対する仮想空間操作を実現した例について述べる。そこでは、仮想物体の入力操作に対する応答を含め、仮想世界の動的振る舞いがすべて力学に基づいて生成される。また、短時間に大きな力が発生するような瞬発的な衝突にも対応できる剛性と弾性の両方の性質をもつ弾性物体のモデルが提案される。

各章の終わりでは、実現されたシステムの対話操作のリアルタイム性を、対話シミュレーションの処理時間を実際に測定した結果に基づいて様々な側面から論ずる。

第四章では、仮想空間内で紙や弾性物体等の非剛体の性質を有する物体の操作を実現する上で問題となった点や、今後とるべき研究の方向性について論ずる。

## 参考文献

- 1) Krueger M: Artificial Reality 2d ed., Addison-Wesley, Reading, Mass., 1990.
- 2) 服部桂: 人工現実感の世界, 工業調査会, 1991.
- 3) 舘暲, 廣瀬通孝: バーチャル・テック・ラボ, 工業調査会, 1992.
- 4) 廣瀬通孝: バーチャル・リアリティ応用戦略, オーム社, 1992.
- 5) Loeffler C: Virtual Realities, バーチャル・リアリティズ (訳本), 技術評論社編集部訳, 技術評論社, 1993.
- 6) 島田哲夫, 多田幸生: 曲面ロケータによる三次元入力手法, 情報処理学会論文誌, 30(3), pp.302-310, 1989.
- 7) Iwata H: Artificial Reality with Force-feedback: Development of Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator, Computer Graphics, 24(4), pp.165-170, 1990.
- 8) 佐藤誠, 平田幸広, 河原田弘: 空間インタフェース装置SPIDARの提案, 電子情報通信学会論文誌, J74-D-II(7), pp.887-894, 1991.
- 9) 中村 康浩, 吉村 哲也: 3次元直接操作に於けるポインティングのためのビームカーソル手法, 電子情報通信学会春季全国大会講演論文集, D-648, 1991.
- 10) Ware C: Using Hand Position for Virtual Object Placement, The Visual Computer, 6(5), pp.245-253, 1990.
- 11) Sturman D, Zelter D: A Survey of Glove-based Input, Computer Graphics and Applications, 14(1), pp.30-39, 1994.
- 12) 福井幸男, 下条誠: 力覚をフィードバックする操作デバイスによる仮想形状のなぞり動作, 電子情報通信学会論文誌, J74-D-II(8), pp.1052-1059, 1991.
- 13) 井野秀一, 泉隆, 高橋誠, 伊福部達: 感覚フィードバック型ハンドのための把持感覚に関する心理物理的研究, 電子情報通信学会論文誌, J75-D-II(11), pp.1909-1916, 1992.
- 14) 舘暲, 前田太郎: 人工現実感を有するトレイグジスタンスロボットシミュレータ, 電子情報通信学会論文誌, J75-D-II(2), pp.179-189, 1992.
- 15) Galyean T, Hughes J: Sculpting: An Interactive Volumetric Modeling Technique, Computer Graphics, 25(4), pp.267-274, 1991.

- 16) Norton A, Turk G, Bacon B, Gerth J, Sweeney P : Animation of Fracture by Physical Modeling, *The Visual Computer*, 7, pp.210-219, 1991.
- 17) Carignan M, Yang Y, Thalmann N, Thalmann D : Dressing Animated Synthetic Actors with Complex Deformable Clothes, *Computer Graphics*, 26 (2) , pp.99-104, 1992.
- 18) Breen D, House D, Getto P : A Physically-based Particle Model of Woven Cloth, *The Visual Computer*, 8, pp.264-277, 1992.

## 第二章 折り紙シミュレーションシステム

### 2.1 まえがき

本章では、折り紙のモデルを多重に折れ重なるという幾何学的構造に基づいて実現し、それに対するリアルタイムの対話操作を可能とした折り紙のシミュレーションシステムについて述べる。紙は比較的単純な素材ではあるが、多重に折れ重なることにより複雑な面の集合体として様々な形状を表現できる。折り紙は単純な操作の反復により複雑な形を生成していく造形手段の一つであり、本システムはそれ自体、例えば手の不自由な人に創作の手段を提供する等の可能性を秘めているのみならず、本研究において蓄積された対話操作システムの基礎的技術は今後様々な対話システムを実現していく上で重要なものとなる。

#### [従来の研究]

折り紙を対象とした計算機処理に関しては既にいくつかの興味深い研究が報告されているが、それらと本研究との関連について述べる。

安居院ら<sup>1</sup>は折り紙過程のアニメーションを作成する目的で、折り過程の途中の段階を示す数枚のキーフレーム画像から、それらの中間画像を紙の頂点や辺の位置関係に基づいてうまく生成する方法を提案している。内田ら<sup>2</sup>は折り紙の展開図から紙の幾何学的な制約条件をもとに折り紙の最終状態を推論する方法を提案している。しかしながらこれら研究の主眼は、2枚の画像間の補間や推論アルゴリズムの生成にあり、インタラクティブな操作の実現や折り紙のモデルの生成とは直接関係しない。内田らの研究では、折り紙の状態を表現するために「タワー」と呼ばれるデータ構造が与えられていたが、これは対話操作に適した構造をしていない。

折り紙のモデルに対する対話操作に関する研究としては、小森ら<sup>3</sup>や紺野ら<sup>4</sup>の研究が挙げられるが、これらは入力操作がいわゆる仮想空間操作ではなくコマンド入力方式であり、折り紙のモデルについても具体的なものが提案されてはいない。これに対して本システムでは対話型システムに有効な折り紙のモデルを提案し、そ

れに対する折り操作を実際の操作に近い形で実現している。

また、Kergosienら<sup>5</sup>による折り皺を含む紙のモデルに関する報告は現在のシステムとの関連は少ないが、今後より進んだ紙のモデルに対する操作を実現していく上で参考とすべきものである。他に、数学の分野においても折り紙の理論についての研究が数多く報告されているが<sup>6</sup>、折り紙操作をコンピュータ上でシミュレーションしたという例は、報告されていない。

## 2.2 システムの概要

本システムは3次元の仮想空間に存在する紙を自由に折るプロセスをリアルタイム操作で実行することができる。操作者はなめらかに変化していく仮想空間の状態を、スクリーンモニターを通して観察しながら、マウスデバイスで紙の頂点を掴んで移動することにより、実物の紙を折るような感覚で仮想の紙を自由に折っていくことができる。また、「折り曲げ」、「折り返し」、「折り込み」の3種類の基本的な折り操作に加え、紙に丸みをつける「曲げ」操作を組み合わせることにより、単純な平面の紙を、平面と曲面が折り重なった複雑な形状に容易に加工することができる。頂点や辺同士を重ね合わせて折る等の折りを正確に実行することも可能であり、これにより精密な折り紙作品を作成できる。折り操作を記録しておき、過去の折り過程をアニメーションにより再現する機能も備えている。折り紙の表面の絵柄はあらかじめ登録しておいたデジタル画像の中から自由に選択し、変更することができる。

以降の節では本システムを実現する上で重要な事項について順次説明していく。2.3節では、対話型システムに必要な、デバイスからの入力と仮想物体のモデルの状態を対応付けるための様々な操作アルゴリズムについて述べる。紙の折りを、マウスのドラッグ操作による頂点の移動のみで実現するための処理手順を定義する。また、マウスデバイスから得られる精度の低い入力値をもとに頂点や辺同士を重ね合わせて折る等の高精度の折りを実現するための補正機能についても説明する。2.4節では多重に折り重なる折り紙の面の重なりや辺の共有関係等の状態を2分木リストにより記述する方法、折り操作に従ってリストを高速に変更する方法について述べる。2.5節では「曲げ」操作で必要となる紙の自然な丸みの形状を得るため

の、紙のもつ曲げに対する応力に基づくモデルについて述べる。2.6節では、本システムの対話操作のリアルタイム性についての検証を、いくつかの典型的な場合についての操作のシミュレーション実験の結果に基づいて行う。また、システムの実現例とシステム全体についての考察を与える。

## 2.3 「折り」操作の定義と対話的実行

本システムでは、紙面のある頂点を移動することにより1回の折り操作を指定する。これに基づき本節では、実現される折り操作の種類を限定し、それらをマウス入力で行うための操作の定義を行う。また、紙の頂点や辺同士を正確に重ね合わせて折るための頂点位置の自動補正機能や、実際の折り紙のもつ彩り豊かな柄を仮想の紙に正しくマッピングする方法についても述べる。

### 2.3.1 折り操作の種類

本システムでは現在、折れ線周りの面の回転方向や角度の違いによる3種類の基本折りと、平面の一部又は全部を曲面にするための「曲げ」操作が可能である。

#### 1) 折り曲げ (Folding up) と折り返し (Bending)

紙の操作の基本単位である1回の折り操作は、紙面上に定められた、ある1本の線(折れ線)により紙面を2分割し、そのうち一方の面を折れ線を軸に回転させることで実現される。既に幾度か折られた紙を対象とするとき、面同士の重なりや辺の共有の関係から次の折り操作で複数の面が同時に回転する場合(多重折り)と1つの面のみが回転する場合(一重折り)がある。何れの場合についても移動する全ての面が同一方向に回転する折り方を「折り曲げ」(図2-1(a))と呼び、そのうちで面の回転角度が180度(平面折り)のものを特に「折り返し」(図2-1(b))と呼ぶ。

#### 2) 折り込み (Tucking in)

折りの結果にバリエーションを与えるために、ある面を境にして両側の面が折れ線周りに内側向きに回転する「折り込み」(図2-1(c))が用意されている。「折り込み」は「折り返し」と同じく平面内の多重折りであるが、「折り込み」では紙の

状態により折りが不可能な場合や折り方の候補が複数存在する場合が存在するため、これらの判定をするための処理が更に必要となる。この判定処理は面の重なりと辺の共有の有無を同時に考慮した場合分けを必要とする複雑な手続きになり、その判定問題の解決は本研究の主題からはずれる。また実際には、折られる全ての面の回転部分の形状が同一で対称的に折り込む場合が多いので、現段階では「折り込

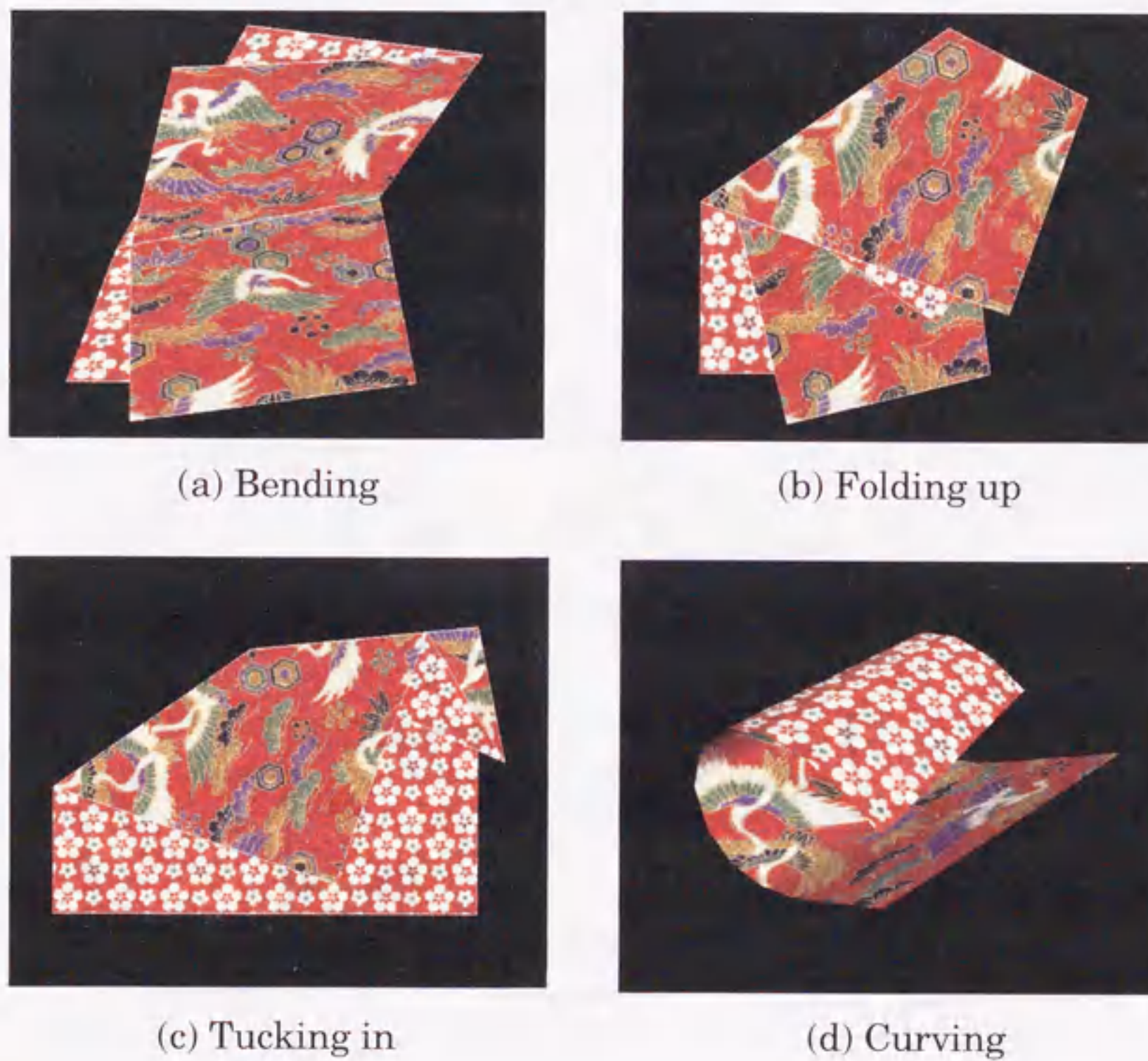


Fig.2-1 Three types of folding operation with a crease and a curving operation. A curved face is approximated by a set of ribbon-like polygons.

図2-1 折れ線を伴う3種類の折りと「曲げ」操作。曲面部分は等幅の細長い長方形ポリゴンの列により近似されている。

み]操作をこのような場合に限定し判定処理は行わないこととした。オペレータは自分の頭の中で折り紙の状態をイメージしているので、実際に操作してみた限りではさほど問題にはならなかった。

また、頂点の移動先の指定に加えて、平面折りの場合には「折り返し」と「折り込み」の一方を選択する必要があるが、この指定はキーボードのキーの On, Off の状態により行っている。

これらの基本折りを組み合わせることにより、更に複雑な多重折りを実現できる。図2-2は鶴を折る過程にある「袋折り」が「折り込み」と「折り返し」の組み合わせによって実現されることを示している。

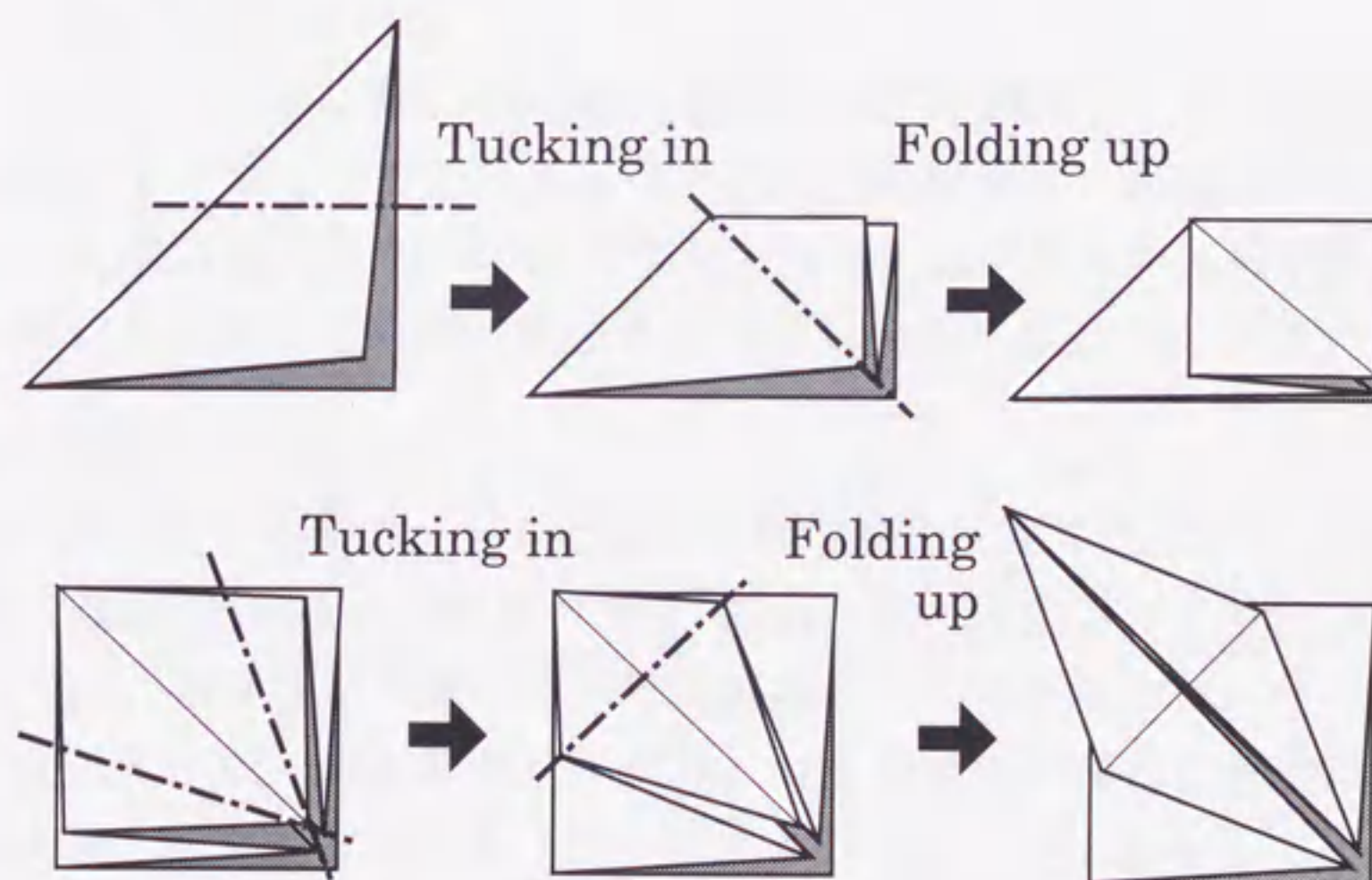


Fig.2-2 Complex folding realized by combining simple folding. These are two stages in folding a paper crane.

図2-2 基本折りの組み合わせによる複雑な折り。折り鶴の途中の段階の「袋折り」も「折り込み」と「折り返し」を組み合わせることにより実現できる。



### 3) 曲げ (Curving)

「曲げ」(図2-1 (d))は、床の上に置かれた紙の頂点を移動する感覚で、紙面の一部又は全部を曲面に加工する操作である。曲げられた面は床面に接している平面部分とそれ以外の曲面部分から構成されるが、これら2つの部分の境界と曲面部分の形状は、紙のもつ曲げに対する弾性力を模倣した比較的単純な物理モデルにより決定される。「曲げ」操作についてもボタンにより他の折り操作と区別される。「曲げ」操作に関しては2.5節で詳しく述べる。

#### 2.3.2 マウス入力による基本操作

1回の折り操作は、マウスのボタンを押したままカーソルを移動するいわゆるマウスのドラッグ操作により、「紙の頂点を掴まむ」、「頂点を掴まんだまま移動する」、「頂点を離す」、の一連の動作として実現される。

##### 1) 頂点の選択 (図2-3 (a))

マウスの中央ボタンを押した瞬間に、紙面の全ての頂点のうちから2次元のスクリーン投影像上でカーソルから最も近い頂点(選択頂点)が選択される。この時カーソルの位置は選択頂点の位置に変更される。選択頂点の候補が複数存在する場合は、視点から最も近い面に属する頂点を選択される。

##### 2) 頂点の移動 (図2-3 (b))

ボタンを押している間カーソルの移動に伴い自動的にかつ逐次的に、選択頂点の移動先座標の獲得、折れ線と折り曲げ角度の決定、折り結果のスクリーンへの表示が行なわれる。この反復は非常に短い時間間隔で行なわれるので、オペレータはスムーズに変形する折り紙を観測しながら、マウス操作で頂点を直接移動することにより折れ線と折り曲げ角度をリアルタイムで自由に変化させることができる。

頂点の移動は、スクリーンに平行な2方向についてはマウスカーソルの位置で与えられるが、奥行方向については3つのマウスボタンのうち両サイドの2つのボタンにより制御される。左ボタンが押されている間頂点は一定の速度で視点から遠ざかり、右ボタンでは視点に近づく。頂点を奥行方向に移動すると折り紙のスクリーンへの投影像が変化するので、これにより頂点の奥行き方向の大まかな位置を知ることができる。

## 3) 頂点の解放 (図2-3 (c))

ボタンを離した瞬間に選択頂点の移動先が固定され、この時の折り結果が折り手順の履歴に登録される。以後カーソルは、選択頂点と離れて単独で移動する。

現在、入力デバイスとして標準のマウスを用いているが、これを3D デジタルペンやデータグローブ等に置き換えることにより、頂点を移動する操作は、より容易に行えるようになる。

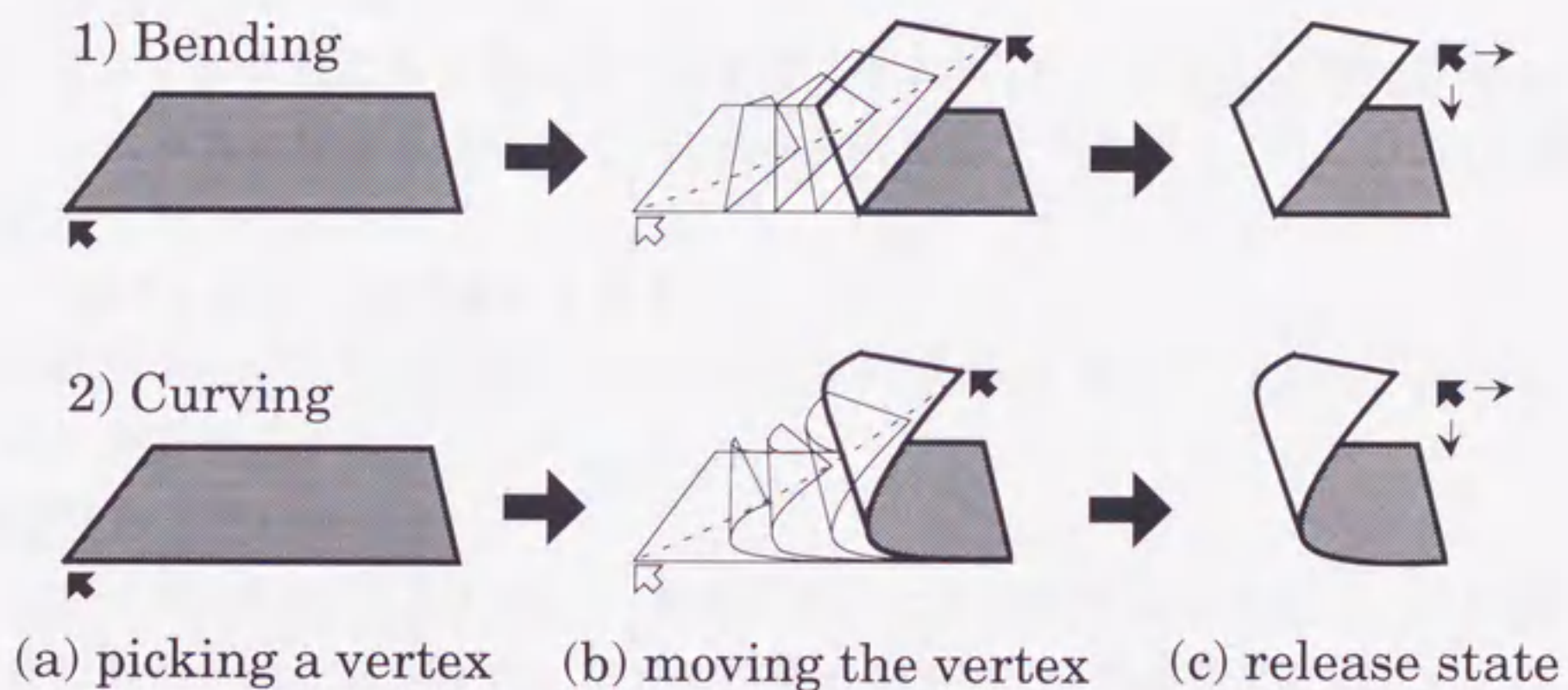


Fig.2-3 Three stages in a folding operation. They are performed by dragging the mouse. The shape of the face is modified smoothly according to the movement of the mouse.

図2-3 1回の折り操作を構成している3つの動作。これら一連の動作はマウスのドラッグ操作より実行される。マウスの動きに伴い折り紙の形状がなめらかに変化する。

### 2.3.3 頂点位置の自動補正

マウスを操作してスクリーン上で頂点や辺同士を正確に重ね合わせる等の作業を行うことは面倒である上に、ピクセル間隔以下の精度で行うことは不可能である。このような操作をスムーズかつ高精度で行なえるためには、頂点の移動中に頂点や辺の位置関係が重なりの状態にある程度近づいた場合にそれらの重ね合わせを自動的に行う機能があれば良い。このように、対話操作を容易にするためのルールを操作アルゴリズムに含めることは、操作性の良い対話システムを実現する上で重要である。現在、本システムでは以下の4つのタイプの自動補正を実現している。

#### a) 頂点同士を重ね合わせて折る

選択頂点とある程度近い頂点が存在すれば選択頂点の位置をその頂点の位置に変更する。

#### b) 辺同士を重ね合わせて折る

選択頂点を含む辺とある程度近い辺が存在すれば、それら2辺が同一直線上で重なるように頂点の位置を変更する。2辺の距離には一方の辺と、他方の辺の両端点との距離を用いている。

#### c) 折れ線が、ある2つの頂点を通る

折れ線からある程度近い頂点が2点存在すれば、折れ線がその2点を通るように頂点の位置を変更する。

#### d) 基準角度で折り曲げる

折り曲げ角度が $90^\circ$  又は $180^\circ$  (基準角度) にある程度近いならば、折り曲げ角度がその基準角度となるように頂点の位置を変更する。基準角度に $180^\circ$  を加えることにより、「折り返し」、「折り込み」の平面折りを容易にしている。また、折り曲げ角度を視点側にしか折り曲げられないように制限することにより、更に折り操作を容易にしている。

これらの補正機能が働くとオペレータは、例えば頂点や辺同士が互いに引き合うように、頂点に目に見えない引力が働いているかのように感じられる。この結果、実際に紙を折るよりも正確かつ迅速に仮想の紙を折ることが可能になる。また、これらの自動補正はマウスを大きく移動することにより解除できる。

### 2.3.4 テクスチャマッピング

グローシェーディングやテクスチャマッピングの処理を高速に行うための専用のハードウェアの開発により、リアリスティックなCG映像をリアルタイムで生成できる時代が到来した。本システムにおいても、これらのレンダリング手法の併用は仮想の折り紙の質の向上に役立っている。折り紙のテクスチャはあらかじめデジタル画像として記憶しておき、その中からポップアップメニューにより自由に選択して変更できるようにした。

面と面のつなぎ目でのテクスチャの連続性が保証される矛盾のないマッピングを実現するために、各頂点は仮想空間内での位置を示す3次元座標に加え、その頂点

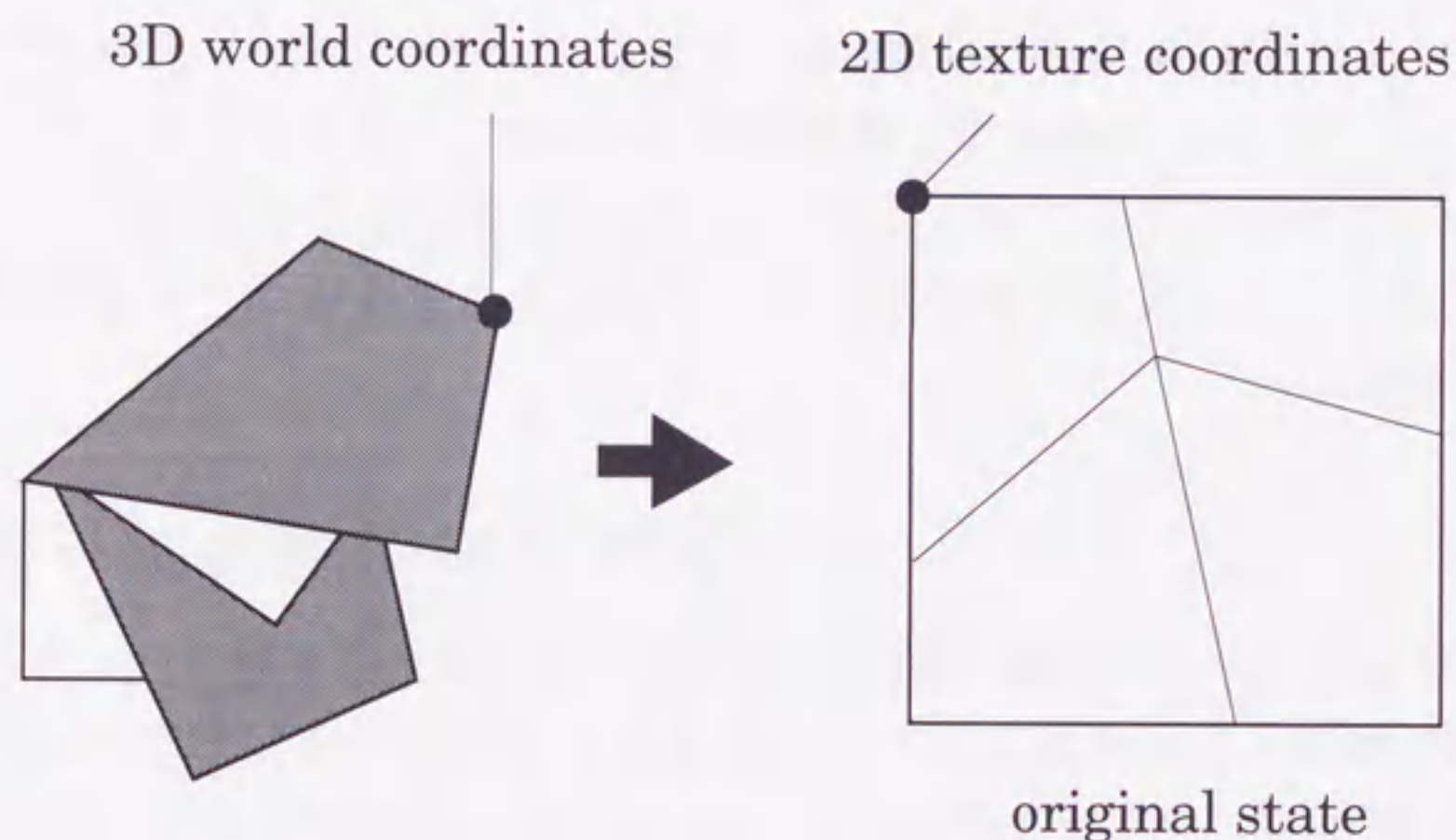


Fig.2-4 Two kinds of coordinates of the vertices. The 2D coordinates on the original texture image correspond to the texture coordinates.

図2-4 頂点のもつ2種類の座標。各頂点の展開図上での2次元座標はテクスチャ画像上の座標に相当する。

がテクスチャ画像上のどこに対応するかを示す2次元座標を保持している。この座標は折り紙を展開したときの2次元座標となる(図2-4)。辺の分割により新しい頂点の座標が、辺の両端点の内分点として求められ、同時にテクスチャ座標も同じ内分比により計算される。また、各面は表裏のどちら側が可視面であるかを示すフラグを保持しており、これを参照することにより表裏に矛盾のないマッピングを実現している。

### 2.3.5 視点の移動

本システムでは4つの基本的な視点移動の組み合わせにより、仮想空間内の折り紙を任意の角度、距離から自由に観測できる。観測物体(折り紙)を原点、視点をX軸上に置くとすると、視点のX,Y,Z軸の周りの回転により視線方向が変更され、視点のX軸上の移動により物体との距離が変更される。各操作はそれぞれキーボード上の2つのキーにより制御される。

ヘッドマウントディスプレイ(H.M.D.)は、頭部の位置や視線方向を検出するためのセンサーをもっており、これらの情報は常に計算機に送られている。本システムでは視点の移動を頂点の移動中にも行なえるようにしているので、H.M.D.を用いれば頭を動かしながら頂点を移動する等の操作も容易に実現できる。

## 2.4 折り紙の幾何学モデル

本システムにおける折り紙の形状は平面と曲面の組み合わせによって表現されるが、本節ではまず「折り曲げ」、「折り返し」、「折り込み」の3種類のみの操作によって生成される、平面のみで構成される折り紙のモデルについて述べる。この限りにおいては折り紙は折れ線によって分割された平面の集合として定義できる。本文では、これを記述するための二分木のデータ構造とその更新手続きを示す。また、データの更新過程において必要となる、すべての折られる面を探索する方法についても述べる。

「曲げ」操作によって生成される曲面を含んだモデルは本節のモデルを拡張することにより実現される。これについては2.5節で述べる。

## 2.4.1 折れ線及び折り曲げ角度の決定

選択頂点の移動先の位置により折れ線 (面の回転軸) 及び折り曲げ角度 (面の回転角度) は一意に決定される。選択頂点の、移動元と移動先の2点からの等距離平面と、折られる面との交線が折れ線となり、これら2平面の交角の2倍が折り曲げ角度となる (図2-5)。頂点の移動先が同じ「折り返し」と「折り込み」は、折れ線と折り曲げ角度は同一となるが、折り結果の面の重なり順序が異なる。

## 2.4.2 データ構造

折れ線により分割される複数の平面の集合として定義される折り紙は、基本的にはサーフェイスモデルと同じ構造をした、面層、辺層、頂点層と呼ばれる3つの層をもつデータ構造により表現される。データ構造には更に、辺や頂点の共有に関する情報等が含まれている。

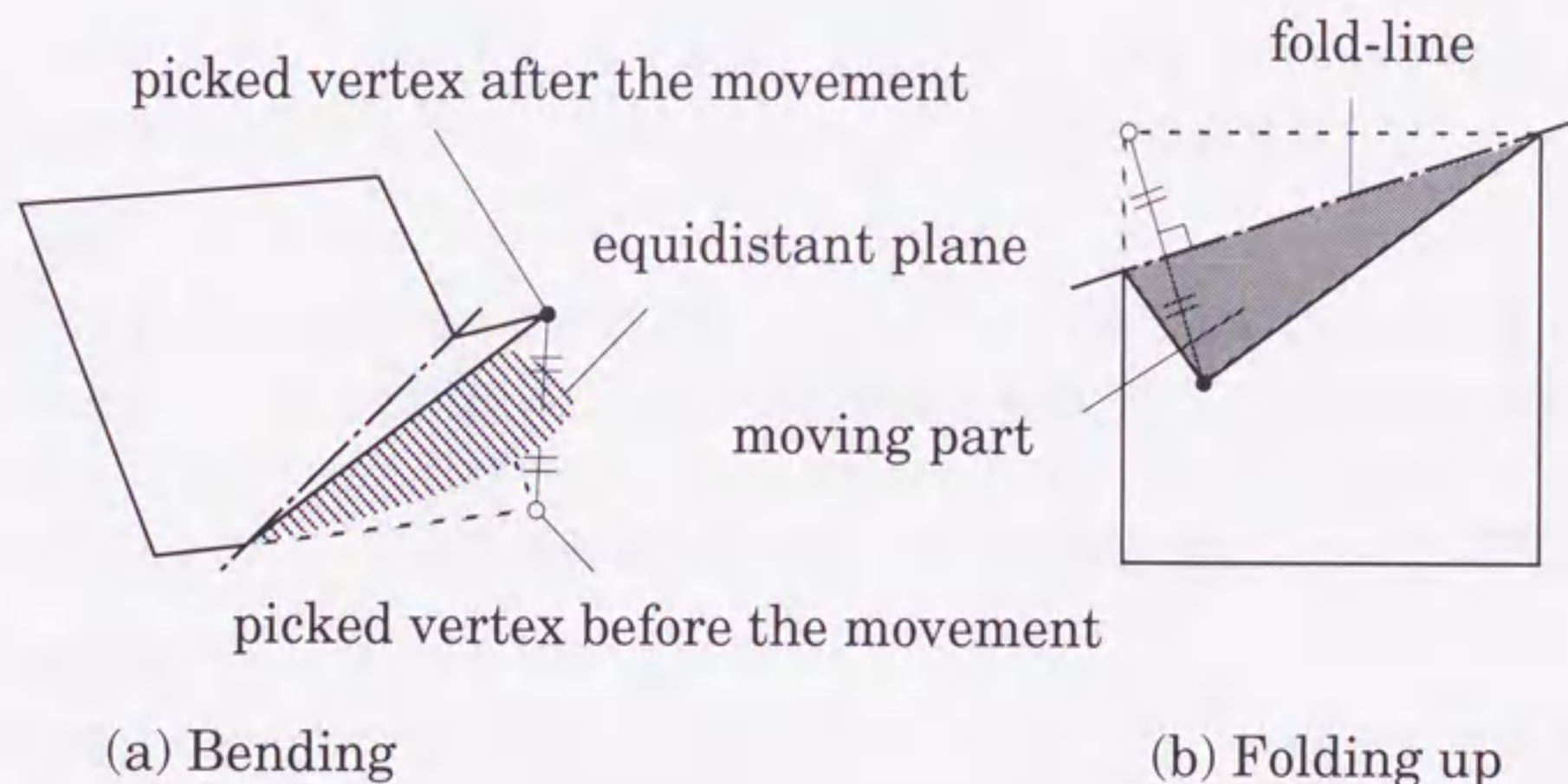


Fig.2-5 The fold-line and the rotation angle of the moving part.

図2-5 移動部分の回転軸 (折れ線) と回転角度。

### 1) 面層

面層は面の分割を表す面セルツリーと、面の重なり順序を与える面セルルックアップテーブルにより構成される (図2-6 (a))。

#### a) 二分木構造

折り紙は1回の折り操作により面が2分割されていくので、面情報の記憶には基本的に二分木のリスト構造が適している。1つの面の情報をもつ面セルが木の節に位置し、面の2分割の際には対応するセルの子孫として、分割後の2つの面の状態を表すセルが2つ生成される。葉のセルの集合が現在の折り紙の状態を、木構造全体が折り操作による面分割の過程の全情報を表している。

#### b) 面グループと面スタック

過去の「折り曲げ」により全ての面が同一平面上にない場合、同一平面に含まれる面同士をグループ化することにより、全ての面はいくつかのグループ (面グループ) に分けられる。また、各グループ内には同一平面上に存在する複数の面に重なり順序 (面番号) を与えるための面スタックがあり、すべての面セルは何れかのグループの面スタックに属する。図2-6 (d) の例では、3つの面のうち面F1は単独で1つのグループを形成する。面セルルックアップテーブルはグループ番号と面番号の組により対応する面セルを面セルツリーから高速に検索する。

### 2) 辺層

辺層は辺の分割を記憶するための辺セルツリーから成る (図2-6 (b))。辺セルツリーも面セルツリーと同様に二分木リスト構造をもつ。ただし、辺の場合は面の分割に伴って分割されるだけでなく、新しく生成もされる。新しい辺が生成されると新たな辺セルツリーが生成されるため、ツリーの総数は増加していく。

### 3) 頂点層

頂点層は頂点セルの線形リストと頂点セルルックアップテーブルにより構成される (図2-6 (c))。頂点セルは対応する頂点の位置の空間座標を保持しており、折り操作に伴う頂点の移動の履歴を頂点セルの線形リストで与える。頂点セルルックアップテーブルは常に線形リストの終端のセルを指示しており、頂点番号に対応する頂点の現在の座標を高速に取得するために用いられる。

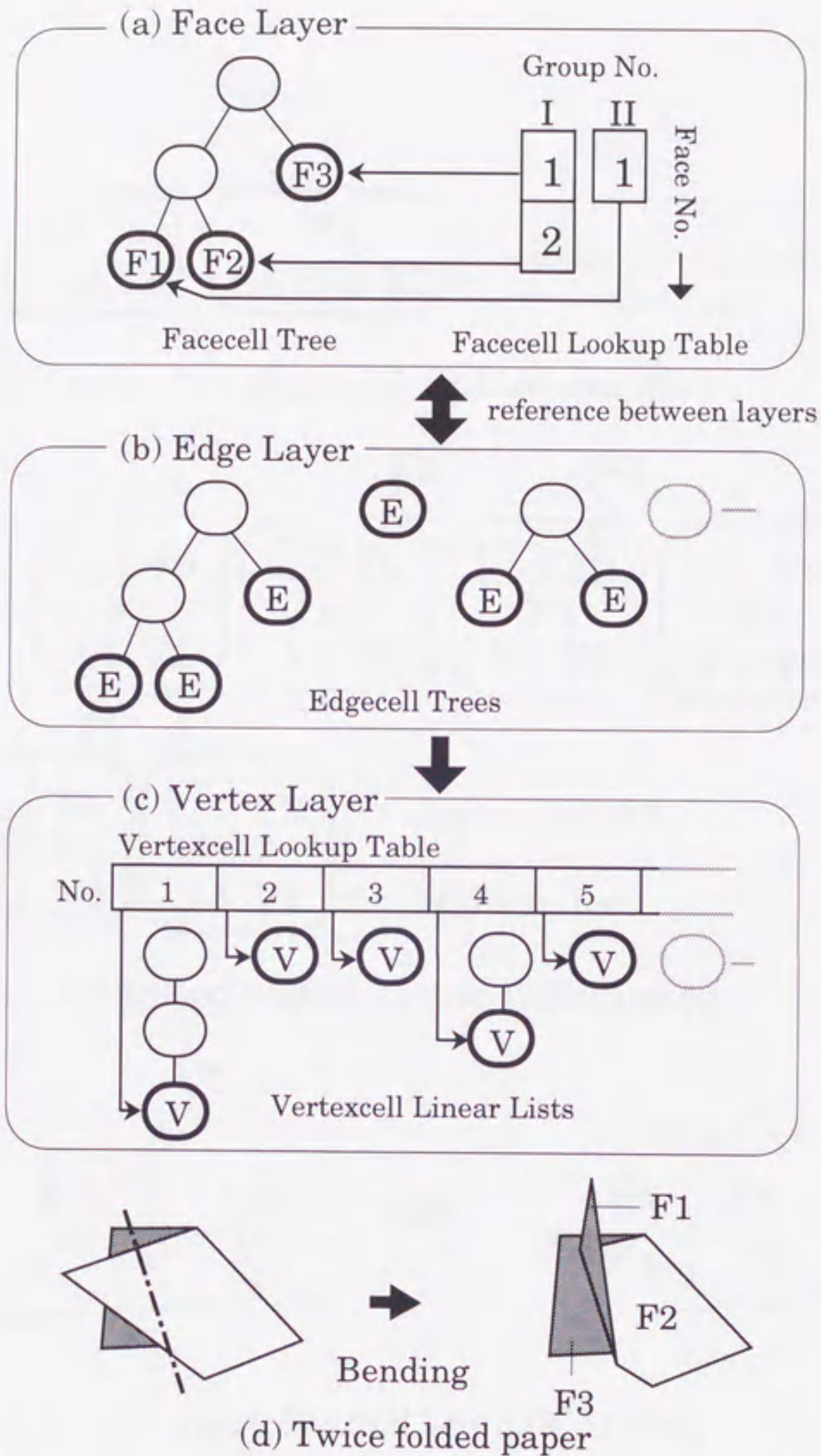
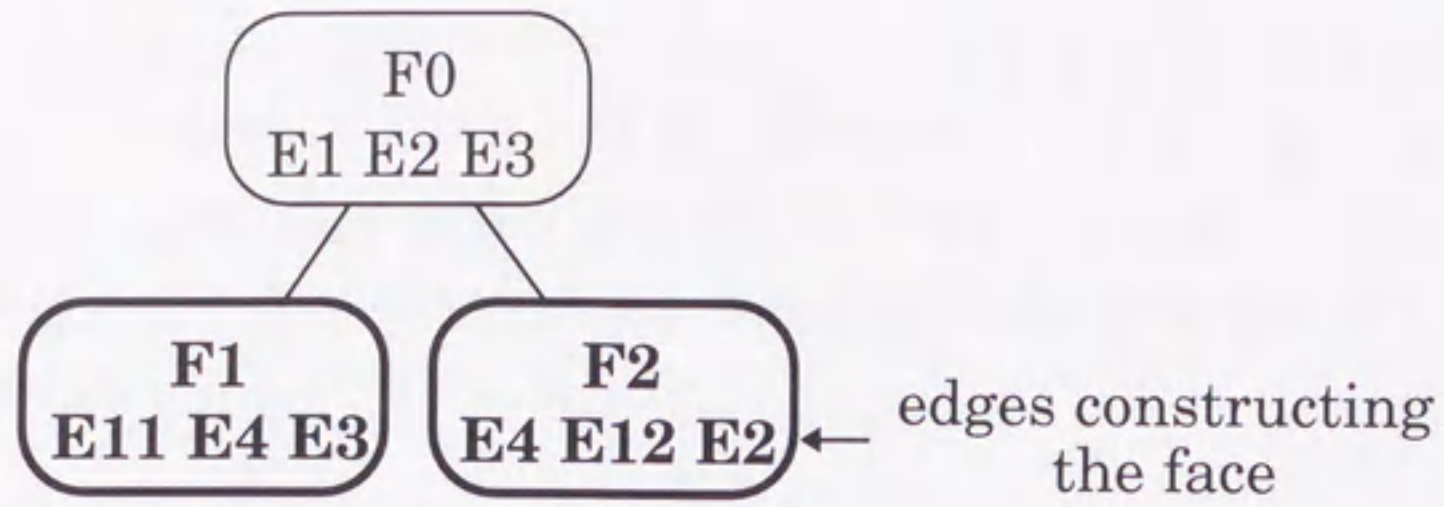


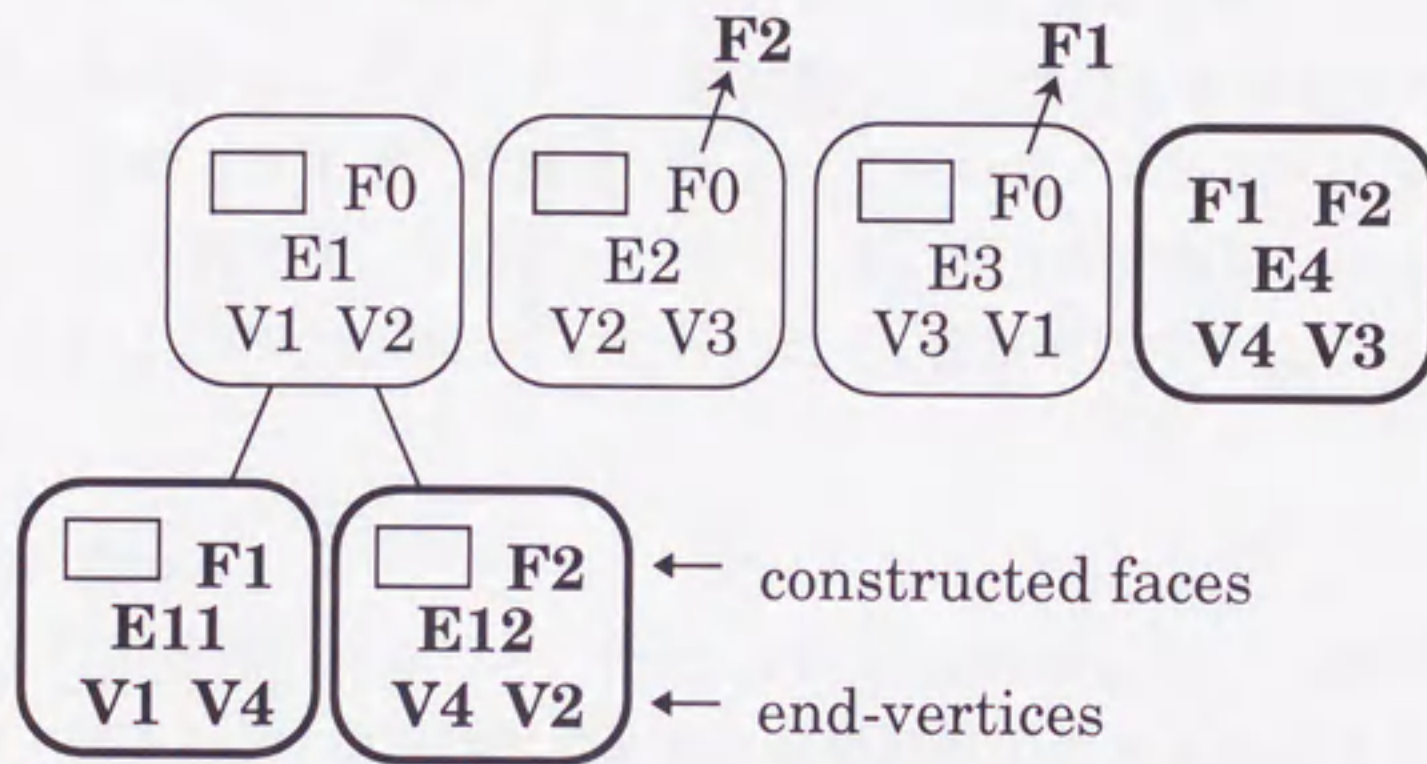
Fig.2-6 . The data structure for a multiply folded state. The whole data (a),(b), and (c) represent the folded state (d).

図 2-6 多重に折られた紙を表現するためのデータ構造。(d) の折り紙の状態は (a) (b) (c) のデータによって表現される。

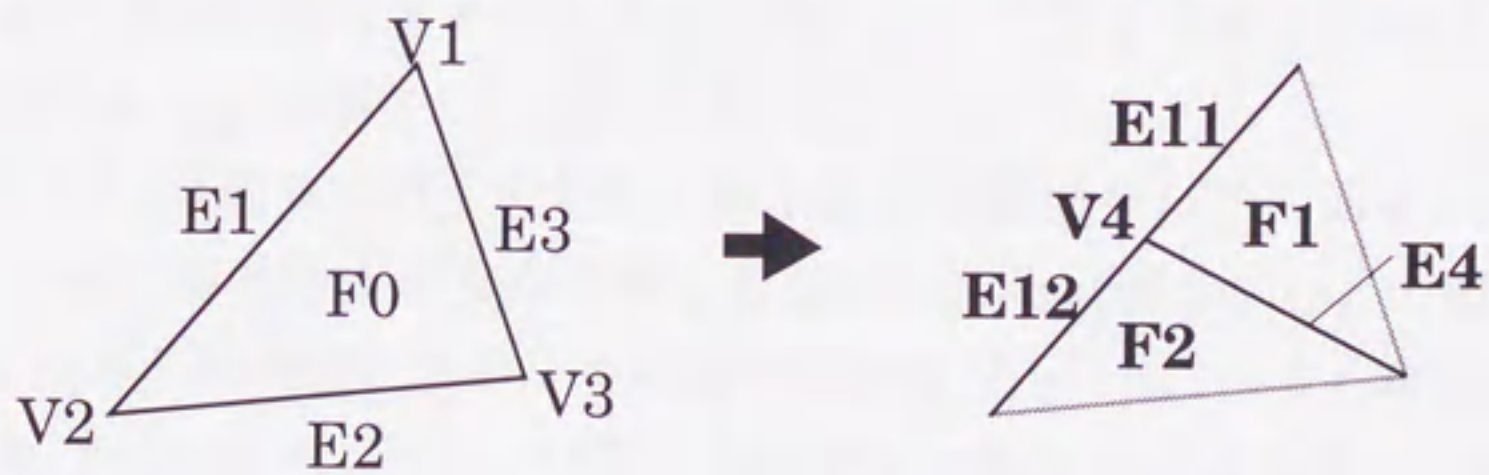




(a) Generated facecells and information



(b) Generated edgecells and information



(c) A divided triangular face

Fig.2-7 Renewal of trees according to the face division.

図 2-7 面の分割に伴うリストの更新。

データセルは他の層の関連するセルをポインタや番号により高速に検索することができ、2.4.4節で述べるリストの更新や面のレンダリングの際に用いられる。実際には、面セルはその面を構成する辺セルへのポインタ配列（図2-7 (a)）を、辺セルはその辺を含む面セルへのポインタ及びその辺の両端点の頂点番号（図2-7 (b)）を保持している。

### 2.4.3 面の分類

多重折りにおいて正しい折り結果を得るためには、ある面が折られる際に辺の共有による面の接続や面の重なりから一緒に折られる他の面を探索する必要がある。すべての面が移動される面（移動面）とそうでない面（不動面）に分けられる。更に移動面は分割される面（分割面）とそうでない面（非分割面）に分けられる。面層、辺層の更新はこの分割面について行われる。分割面は次の2つの手順に従って抽出される。

#### 1) 移動面の探索

図2-8 (a) の折り返しにおいて、面F2は面F1の移動に伴い一緒に移動する。3つの面のうち面F3だけが不動面である。移動面を探索する手順を以下に示す。

- a) 選択頂点を含む面は明らかに移動面である（図2-8 (a) (b) (c) の面F1）。
- b) ある面が移動面ならその面の移動部分において辺を共有する面は移動面である（図2-8 (a) の面F2と (c) の面F4）。
- c) 「折り返し」「折り曲げ」の場合、ある面が移動面ならその面と、面の回転していく側で移動部分が重なる面は移動面である（図2-8 (b) の面F2）。
- d) 「折り込み」の場合、ある2つの面が移動面なら（図2-8 (c) の面F1,F4）、その2面の間であり、それらの面の移動部分と重なりがある面は移動面である（図2-8 (c) の面F2,F3）。
- e) a) ~d) の手順により移動面とならなかった面は不動面である（図2-8 (a) の面F3）。

手順b), c), d) では、過去に検出された移動面の移動部分を新たな移動面の検出に用いているが、移動面は検出されると、以下に述べる分割面の判定および面の分割処理により面の移動領域が即座に判定されるので、これらにおいて問題は生じない。

## 2) 移動面の分類

移動面は更に折れ線の両側にまたがる分割面（図2-8の面F2）とそうでない非分割面（図2-8の面F1）に分類される。分割面は折れ線により2分割され一方の面が回転するが、非分割面は分割されず面全体が回転する。この分類は面の頂点と折れ線との位置関係を調べることにより行なわれる。

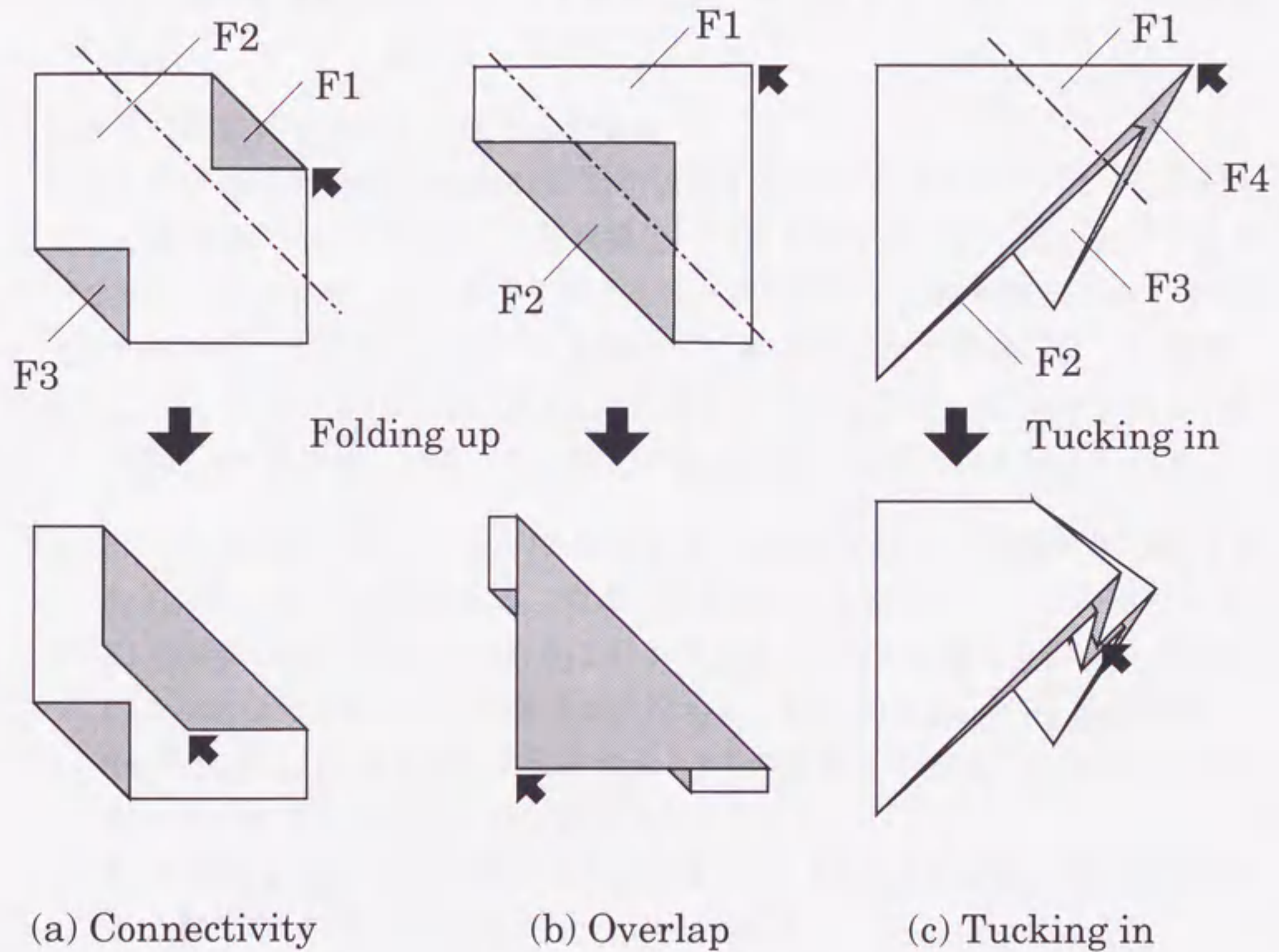


Fig.2-8 Three kinds of faces in a folding operation. Some faces are moved, and some of them are divided further according to the movement of the picked vertex.

図2-8 折り操作における3種類の面。選択頂点（左上向き矢印）の移動に伴い移動する面と、更にその中に分割される面が存在する。

#### 2.4.4 リストの更新

本節では2.4.2節で述べたリスト構造のデータ群の、折り操作に伴う更新手続きについて述べる。更新の前半では、2.4.3節の探索手続きにより抽出された分割面に対して面の分割処理が行われ、関係のある面セル、辺セルの内容が更新される。これとは独立して、後半では、移動した頂点に対応する頂点セルの更新と、新しく生成された折り紙の面の順序を与える新しい面セルルックアップテーブルの生成が行われる。

##### 1) 面の分割に伴う面セル、辺セルの更新

面の分割に伴うセルの更新処理は、面を構成するすべての辺について、反時計回り（又は時計回り）に一周、各辺と折れ線との関係を判定していく間に完了することができる。ここでは、その様子を図2-7の三角形の面の分割を例にとって示す。三角形の面F0は、頂点V1, V2, V3及び辺E1, E2, E3により構成され、分割されて面F1, F2になる。これに伴い辺E1は分割されて辺E11, E12になり、新しい辺E4及び頂点V4が生成される。この時のセルの内容の変更過程を以下に示す。

- a) F0の分割に伴い面セルF1, F2および辺セルE4が新しく生成され、E4を含む面がF1, F2に決定される。ただしE4は新しい辺セルツリーの根である。
- b) E1の分割に伴い辺セルE11, E12および頂点セルV4が新しく生成され、E11, E12の内容とE4の1つの端点が決定する。またE11, E4がF1の構成辺に、E4, E12がF2の構成辺に加えられる。V4の座標もこの時に計算され、頂点セルルックアップテーブルに登録される。
- c) E2を含む面の1つがF0からF2に変更され、E2がF2の構成辺に追加される。またE4の残りの端点がV3に決定される。
- d) E3を含む面の1つがF0からF1に変更され、E3がF1の構成辺に追加される。

更新手続きは辺の数が4以上の面についても同じ要領である。また多重折りの際には全ての分割面に対して更新手続きが行なわれる。

##### 2) 頂点セルの更新

移動面探索における面の重なり判定は頂点の移動する前の座標に基づいて行なう

必要があるので、頂点セルの更新は面セル、辺セルの更新後に独立して行なう。全ての移動する頂点について線形リストの終端に新たに子のセルが生成され、面の回転による頂点の移動後の座標を与える。頂点セルルックアップテーブルについても、ポインタが線形リストの終端を指示するように更新される。

### 3) 面セルルックアップテーブルの更新

1回の操作で折られる面はすべて同一平面上にあり唯一の面グループに属するので、面セルルックアップテーブルの更新はそのグループのみに対して行なわれる。操作前の面の重なり順序と折り方の種類から操作後の新しい面の重なり順序を示すテーブルが決定される。図2-9は各折り操作における面の順序づけを断面図で表したものである。「折り曲げ」では、すべての移動する面のみで再度順序づけを行い、それらの面で新しい面グループを構成する。「折り返し」では、移動する面を残りの面の上に逆順に積み上げれば良いことがわかる。最後の「折り込み」は、「折り返し」の方法を対称的に組み合わせることにより実現される。

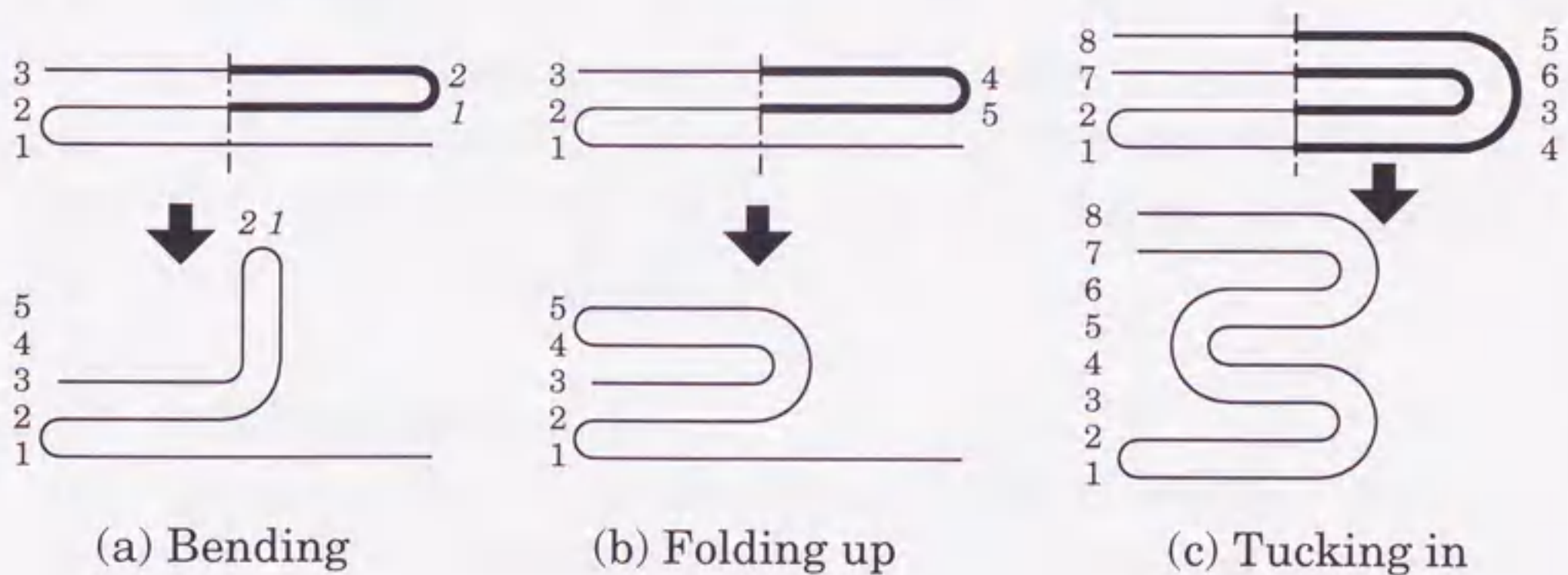


Fig.2-9 Renewal of the face order. Bold line represents the moving part of the faces.

図 2-9 面順序の更新。太線は面の移動部分を示している。

#### 4) リスト更新の逆手続き (Undo)

本システムのデータ構造は過去の紙の状態を履歴情報として保持しているため、折り操作を間違えた時などに、初めからやり直すことなく操作をキャンセルすることができる。過去のリストの状態は、現在のリストに更新とは逆の手続きを施すことにより逆順に再生される。各セルは何手順目の折り操作で自分が生成されたのかを記憶しており、これにより不要となったセルを消去することが可能である。面セル、辺セル及び頂点セルルックアップテーブル内のセルポインタが消去すべきセルを指示している場合は、消去されるセルの親セルを指すように変更すればよい。例えば図2-7で面セルF2が消去される際には、辺セルE2内の面セルポインタがF2からF0に復元される。

## 2.5 折り紙の物理モデル

折り紙は本来、紙を反復して折ることにより様々な形状を生み出すものであり、実際の折り紙作品も平面のみの組み合わせで出来ているものがほとんどであるが、形状に曲面を含めることにより折り紙の可能性は大きく広がる。実際の折り紙の中にも自然な丸みを利用して美しい形状を表現しているものもある。本システムでは紙の自然な丸みの形を、紙のもつ曲げに対する応力を模倣した物理モデルを用いて生成している。曲面を生成する「曲げ」操作は、この自然な曲面形状を得るための物理モデルを、前節で述べた多重に面が折り重なった折り紙を表現するための幾何学モデルに結合することにより実現される。

### 2.5.1 曲面形状の限定

「曲げ」以外の折り操作では選択頂点の移動後の位置から折れ線が一意に決定された。「曲げ」操作でも選択頂点の位置の指定のみにより曲面形状を制御することを考える。この場合、曲げられた面の結果の形状は、選択頂点と床面の空間的制約により、床に接する平面部分と宙に浮いている曲面部分をもつものになる(図2-10)。更に、紙を伸縮のない平面素材と仮定すれば、曲面部分の形状は円柱または円錐面となる。ここで、曲面の形状を円柱面に限定すれば、その形状は一意に決まる。これらの限定条件のもとで頂点の移動に基づいた「曲げ」操作を実現する。

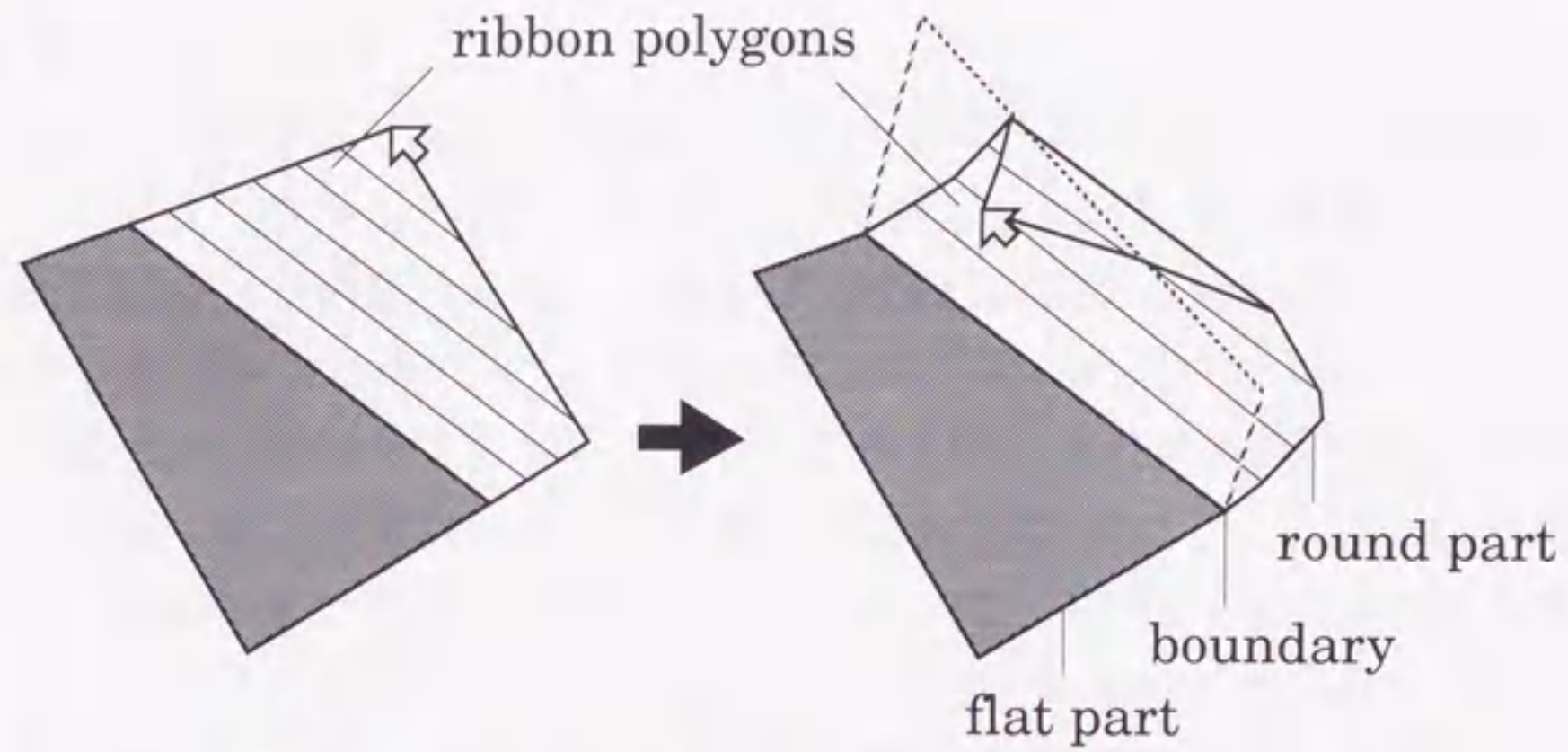


Fig.2-10 Round part and flat part of a curved face. A set of ribbon polygons represents the round part. Dotted line represents the operation Bending along the boundary between the round part and the flat one.

図2-10 曲面部分と平面部分をもつ面。曲面部分は等幅ポリゴンから構成される折れ面により近似される。点線は曲面部と平面部の境界を折れ線とする「折り曲げ」を示す。

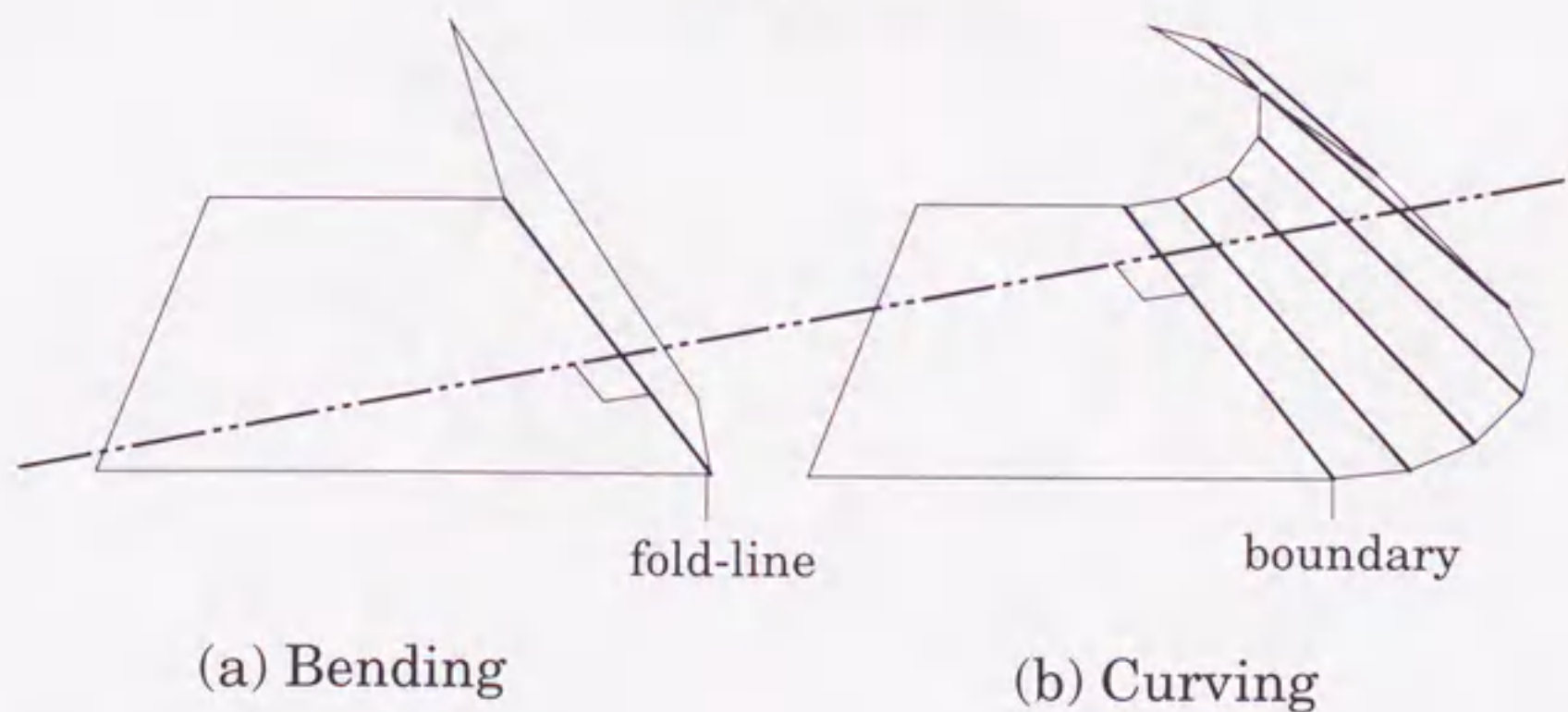


Fig.2-11 Bending and Curving whose picked vertices are put in the same position. Lines dividing the curved face are parallel to the fold-line in Bending.

図2-11 選択頂点の位置が同一の「折り曲げ」と「曲げ」。曲面部分を等幅セグメントに分割している線は「折り曲げ」における折れ線と平行関係にある。

## 2.5.2 曲面形状の表現

ポリゴンレンダリングに基づく現在のリアルタイムCGのハードウェア機構を利用するためには、一般に円柱面は一連の細長い等幅ポリゴンにより多面体近似されるので、曲面部分と平面部分をもつ面は全体的には図2-10に示すような形のポリゴンの集合体で近似される。このとき、曲面部分を等幅のセグメントへ分割するための分割線の方角を決定する必要があるが、この方向は選択頂点の位置が同じ「折り曲げ」によって生じる折れ線に平行となる(図2-11)。逆に、これ以外の方向に分割すると、各分割線での折り曲げ角度をどのようにとっても、選択頂点を移動後の位置へ持っていくことが不可能になる。従って「曲げ」操作では、選択頂点を移動することにより、これらの分割線の方角や曲面部と平面部の境界を自由に変化させることができる。

また、これらの分割線に垂直な方向では曲面の断面形状は断面の位置によらず不変であるので、空間的な曲面形状を決定する問題は、その断面形状を決定するという平面的な曲線形状を求める問題に帰着される(図2-12)。

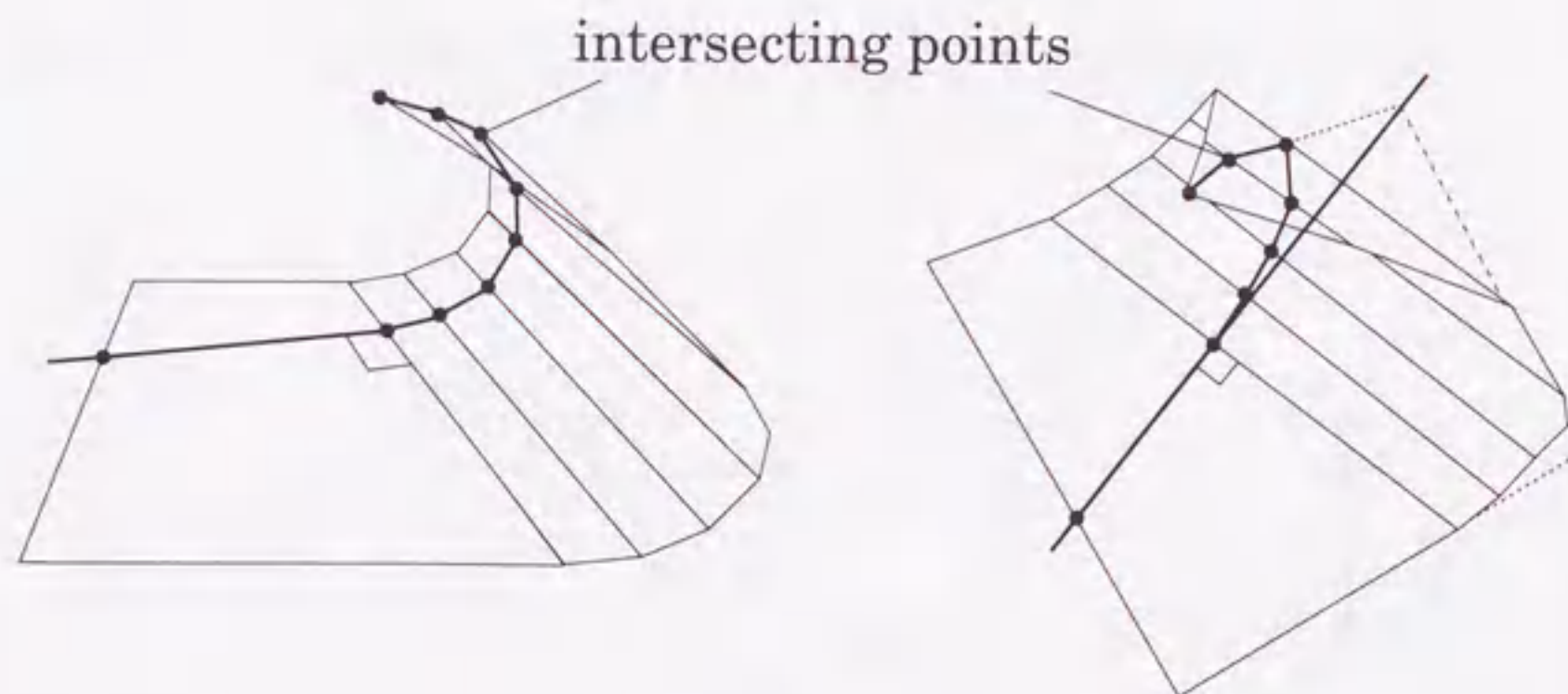


Fig.2-12 The cross sectional shape of the curved face. The bend line determines the shape of the round part uniquely.

図2-12 曲面の形状を決定する断面形状。分割線とそれらに垂直な断面との交差点列は曲面の形を一意に定める。



## 2.5.3 エネルギー関数を用いた断面形状の決定

ある条件を満たすパラメータの値を知りたいときに、パラメータがその条件を満たすときに最小の値をとる関数を設定し、最急降下法等の反復処理でその関数を最小化することにより解を求める数値的解法があり、物理シミュレーションの分野においてもオーソドックスな手法の一つとなっている。曲面が安定した状態では、断面の曲線形状を与える頂点列は、隣り合う頂点間の距離がすべて等幅セグメントの幅  $L$  に等しく、各頂点での折れ曲がり角度がすべて等しくなると考えられるので (図 2-13)、この場合、エネルギー関数は以下のように与える。

$$E = \alpha \cdot Ed + \beta \cdot Ea, \quad (2.1)$$

ここで  $Ed$  は各頂点間距離  $d_i$  の、セグメント幅  $L$  に対する二乗誤差の総和であり、

$$Ed = \sum_i (d_i - L)^2, \quad (2.2)$$

$Ea$  は隣り合う頂点の折れ曲がり角度  $a_i$  の差の二乗誤差の総和である。

$$Ea = \sum_i (a_i - a_{i+1})^2. \quad (2.3)$$

また、係数  $\alpha, \beta$  の値については実験的に最適なものに決定している。

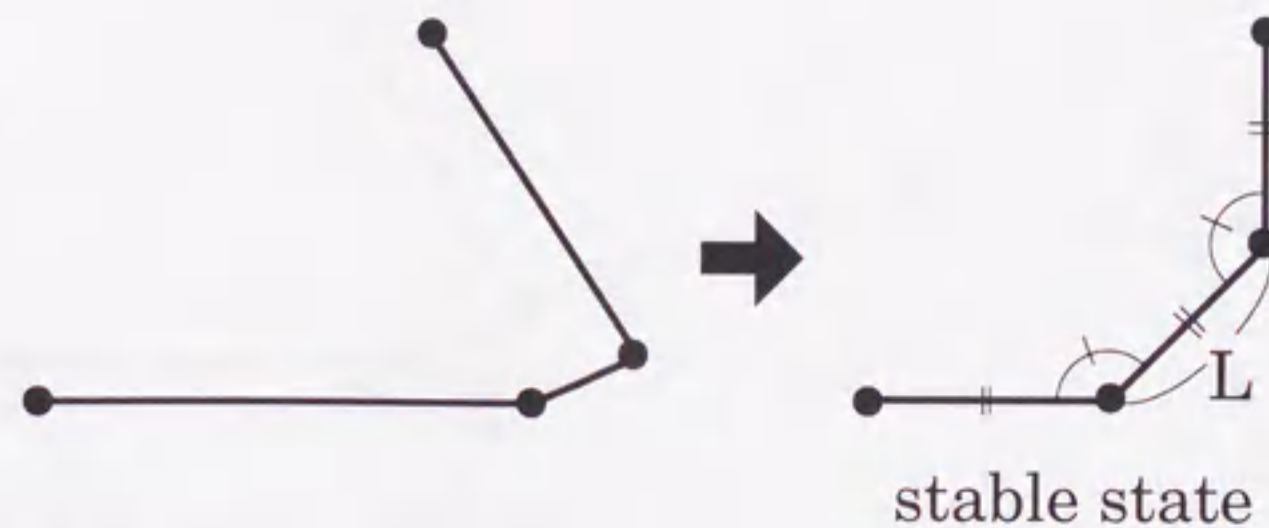


Fig.2-13 The stable state to minimize the energy function.

図 2-13 エネルギー関数を最小にする安定状態

エネルギー関数の値が減少するように各頂点の位置を反復して修正することにより、頂点の位置は、頂点間の距離  $d_i$  がすべて  $L$  に等しく、各頂点での折り曲げ角度がすべて等しくなる安定位置へ収束していく。頂点間の距離  $d_i$  に関する修正では、各反復において  $d_i$  と  $L$  との差が減少する方向に  $d_i$  の両端点の頂点を移動する (図 2-14 (a))。その修正量は  $d_i$  と  $L$  との差に比例し、式 (2.2) より次の式で与えられる。

$$-\frac{\partial E}{\partial d_i} = -2(d_i - L). \quad (2.4)$$

折り曲げ角度  $a_i$  については隣り合う頂点間の折り曲げ角度の差が減少するように、 $d_i$  の場合の修正の方向と垂直な方向に 2 つの頂点を移動する (図 2-14 (b))。その修正量はそれらの折り曲げ角度の差に比例し、式 (2.3) より次の式で与えられる。

$$-\frac{\partial E}{\partial a_i} = -2(a_i - a_{i+1}). \quad (2.5)$$

床面の空間的制約のもとで曲げられた面の形状を決定するためには、エネルギー関数の収束過程に頂点が床の中に侵入しないという制約条件を加える。実際には、各反復において頂点が床に侵入した場合にはその頂点の位置を床面まで戻すという

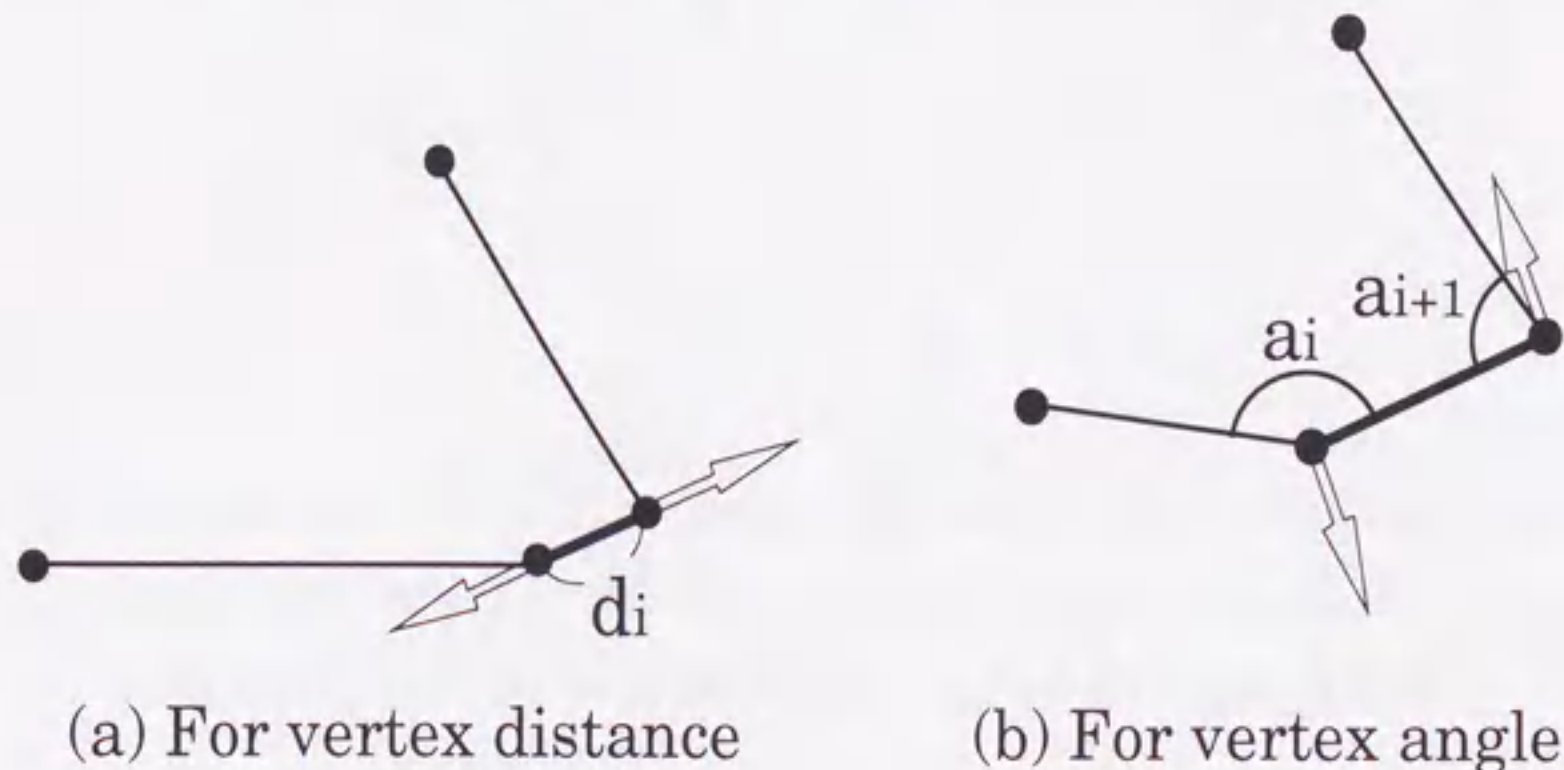


Fig.2-14 Modifying vertex positions to decrease the energy function.

図 2-14 エネルギー関数を減少させるための頂点の移動方向。

操作を行うことにより実現される。この結果得られた頂点列の形状から、床と接している面の範囲や曲面部と平面部の境界の位置を知ることができる。

#### 2.5.4 既存のデータ構造へのリンク

「曲げ」操作は、2.4節の面の分割や辺の共有を表現するための幾何学モデルにおいては、平面部分と曲面部分の境界に折れ線をもつ「折り曲げ」として扱われる。曲面部に対応する面については通常の数に加え、曲面形状を与えるポリゴンの頂点座標等の情報がリンクされる(図2-15)。このように、「曲げ」操作は、既存のシステムを大きく改変するのではなく、拡張することにより実現される。

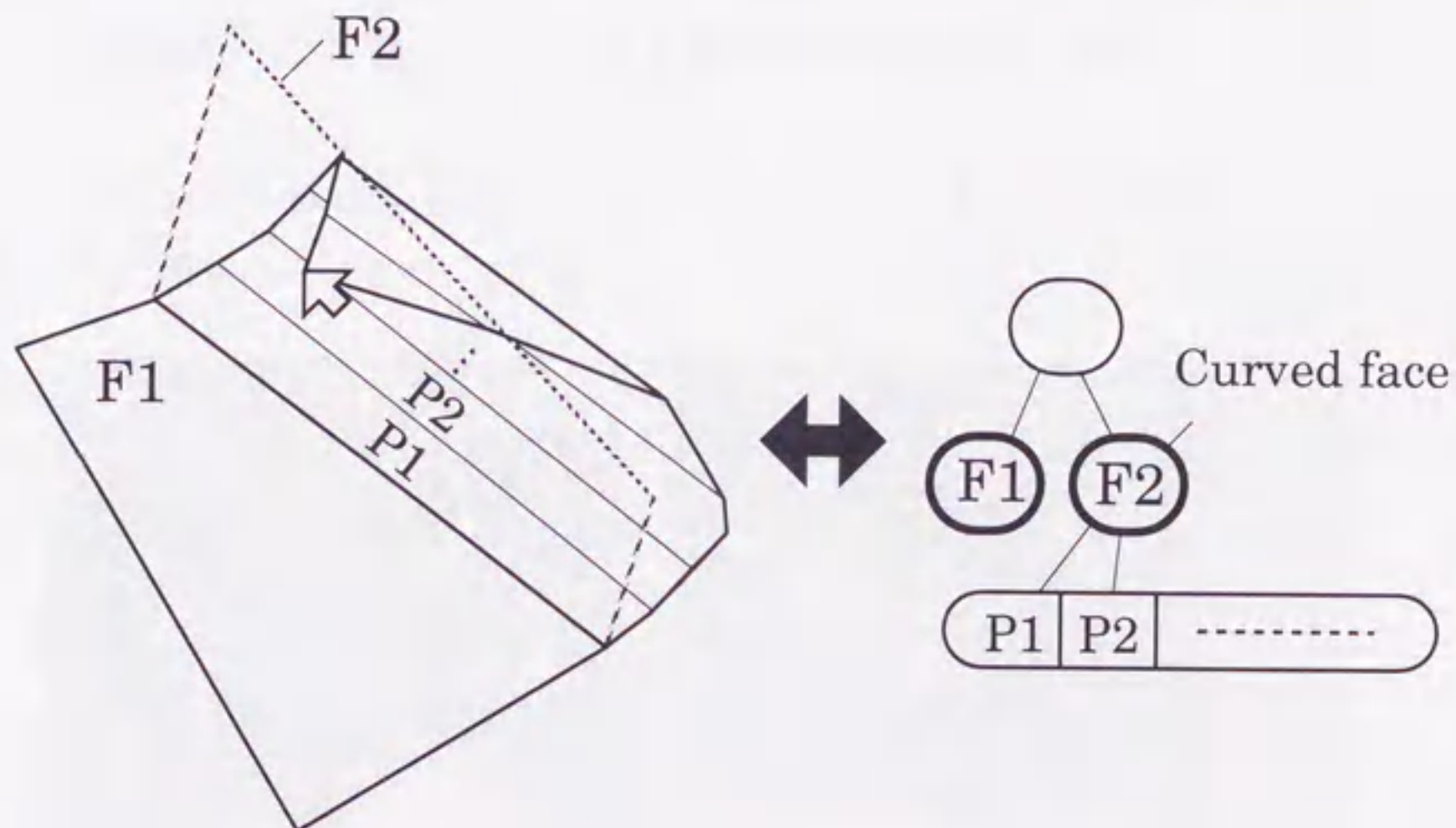


Fig.2-15 The data structure for curved faces. Curving is treated as Bending in the geometric model. Data cells for curved faces also include the sequence of vertex coordinates of ribbon polygons.

図2-15 曲面のデータ構造。「曲げ」は幾何学モデルにおいては「折り曲げ」として扱われる。曲面に対応するセルは更に曲面形状を与えるポリゴンの頂点座標等の情報を持っている。

## 2.6 システムの実現と評価

### 2.6.1 システムの実現

本システムは IRIS Crimson Reality Engine 上で約 6000 行の C 言語のプログラムにより実現されている。Crimson は CG の分野では世界的に最も頻繁に使用されている米国シリコングラフィックス社のグラフィックスワークステーションで、テクスチャマッピングをリアルタイムで行うためのリアリティエンジンを装備している。リアルタイム CG に関する研究は、使用する計算機に大きく依存するものであるが、今回使用した計算機は、現在世界最速のものよりも演算処理装置、グラフィックスハードウェア共に 1 ランク下位のものであり、次節で述べるシステムの対話性に関する実験の結果は現在の計算機能力の標準的なクラスによるものであるといえる。

本システムの操作の様子を図 2-16 に、本システムを用いて対話的に作成された折り紙の作成例を図 2-17 に示す。



Fig.2-16 A scene of playing Origami.

図 2-16 システムの操作の様子



(a) Cicada



(b) KABUTO



(c) Plane



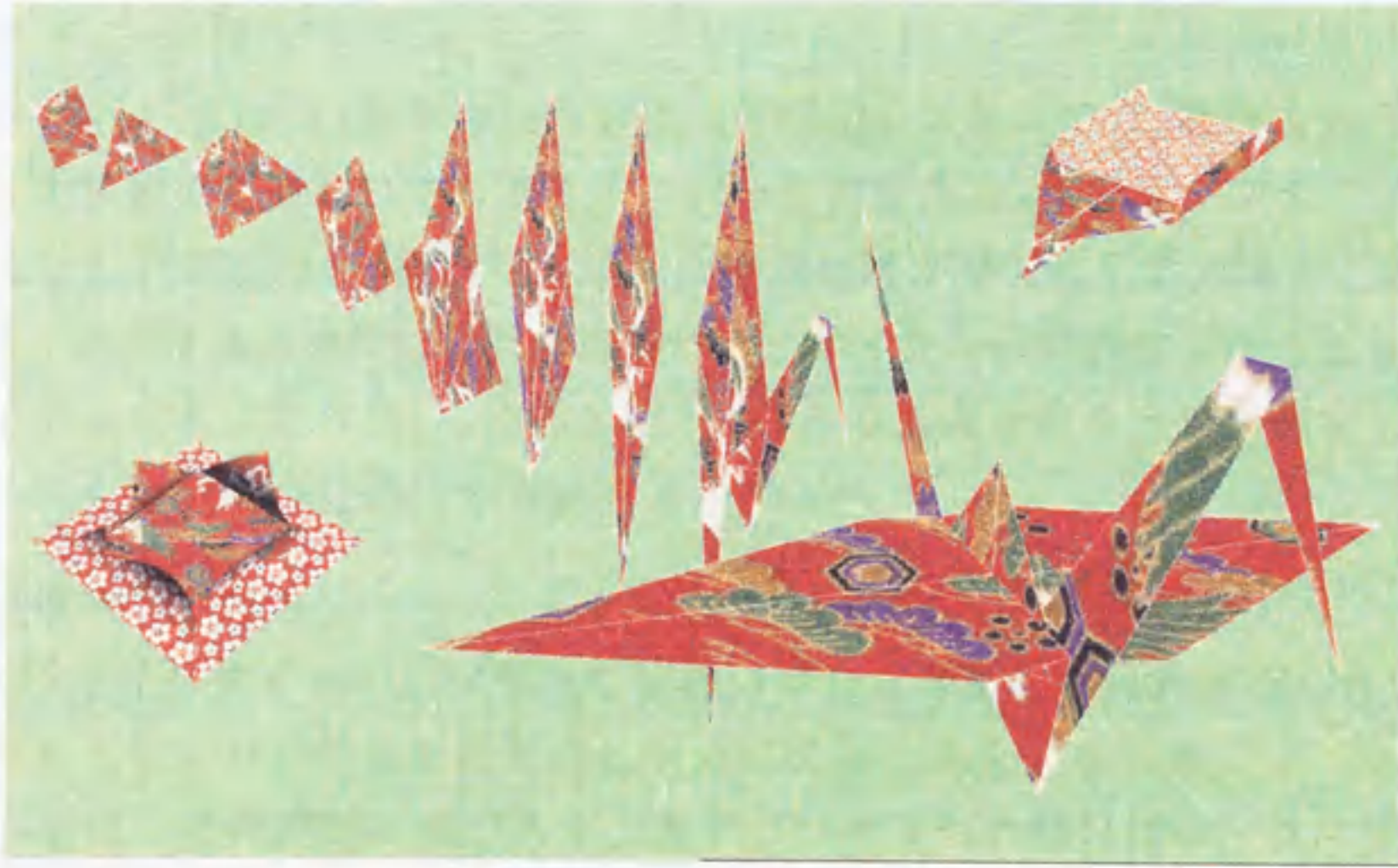
(d) Crane



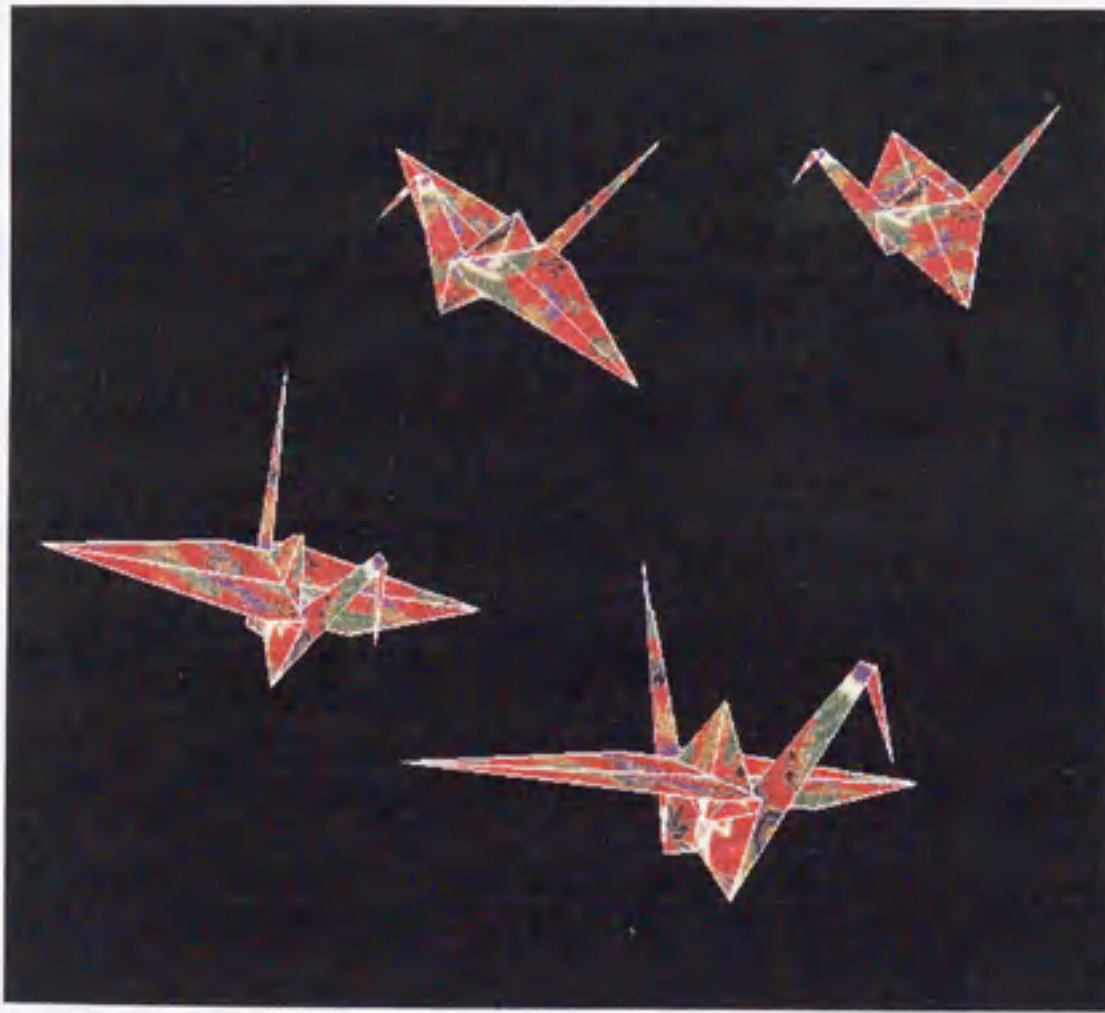
(e) Penguin



(f) Tray



(g) sequence of folding crane



(h) flying crane



(i) flying plane

Fig.2-17 Examples of Origami work. (e) and (f) contain curved faces. (g),(h) and (i) are generated by multiple sheets.

図2-17 折り紙の作成例。(e),(f)は曲面を含んだ例である。(g),(h),(i)は複数の紙を組み合わせたものである。

## 2.6.2 インタラクティビティ

本システムのように物体の操作を扱う対話型システムでは、物体を表現しているモデルの状態の更新をリアルタイムで行う必要がある。インタラクティブ操作中にはこれらの更新処理と、結果のCG像の描画処理が交互に行われるが、システムの対話性を維持するためにはこれらの処理の1サイクルの時間は少なくとも100ms程度以下でなければならない。本節では、これらの処理時間を実際に測定した結果に基づいてシステムの対話性を検証する。

## 1) 反復折りの場合

対話性を検証するためには様々な操作の場合を考慮しなければならないが、典型的な例として、一つの面を繰り返し半分に折った場合を考える。

図2-18は、その測定結果である。棒グラフの3つの部分はデータの更新とそのリセットに必要な計算時間、2.3.3節で述べた頂点位置の補正のための計算時間、およびレンダリング時間をそれぞれ単独で計った結果を表している。点線はこれらの処理を同時に行った場合の真の処理時間を示している。レンダリングがスクリー

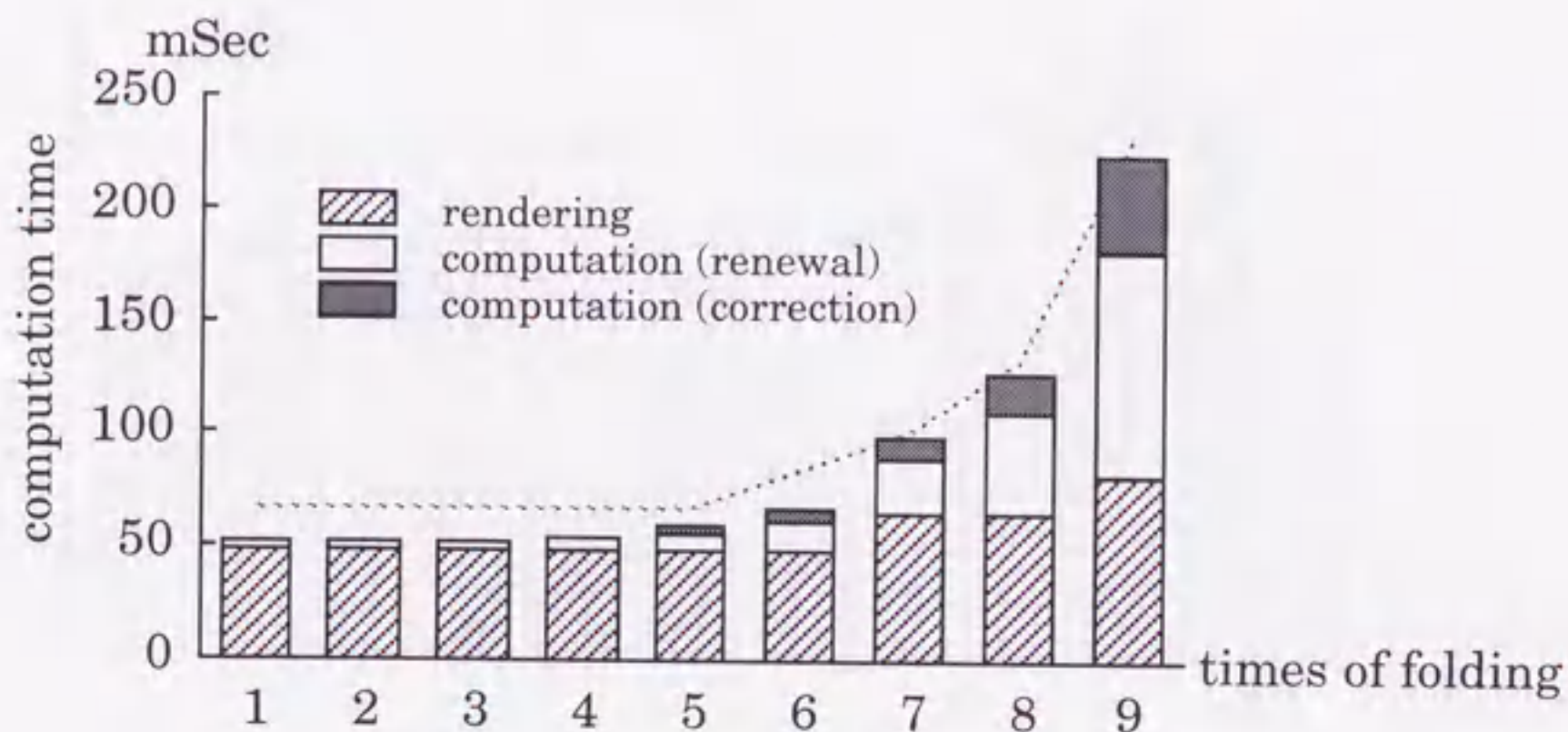


Fig.2-18 Computation time and rendering time in the case that a piece of paper is folded in half iteratively.

図2-18 一枚の紙を繰り返し半分に折った場合の計算時間と描画時間

ンのリフレッシュに同期するため、各時間をそれぞれ単独で測定したものの総和との間に少しずれが生じている。同じ理由からレンダリング時間は 50ms 以下にはならない。

レンダリング時間が折り回数全体を通してほぼ一定であるのに対して 2 種類の計算時間は共に面の数に応じて増加している。面の数は指数関数的に増えるので 9 回折った後では面の数は 512 となり全体の処理時間は 250ms に達している。現在のシステムでは紙の厚みを考慮していないので折り回数が制限されることはないが、実際の折り紙では紙の厚みのために 6 回程度までしか折ることはできない。

## 2) 折り鶴の場合

鶴を折る過程には様々な折りが含まれているので、折り鶴作成過程の結果は一般的な場合の対話性の一つの目安となる。折り鶴の面の数は出来上がった状態でも 80 枚程度であり、図 2-19 に示すように全体の処理時間は、平均で 70ms、最大でも

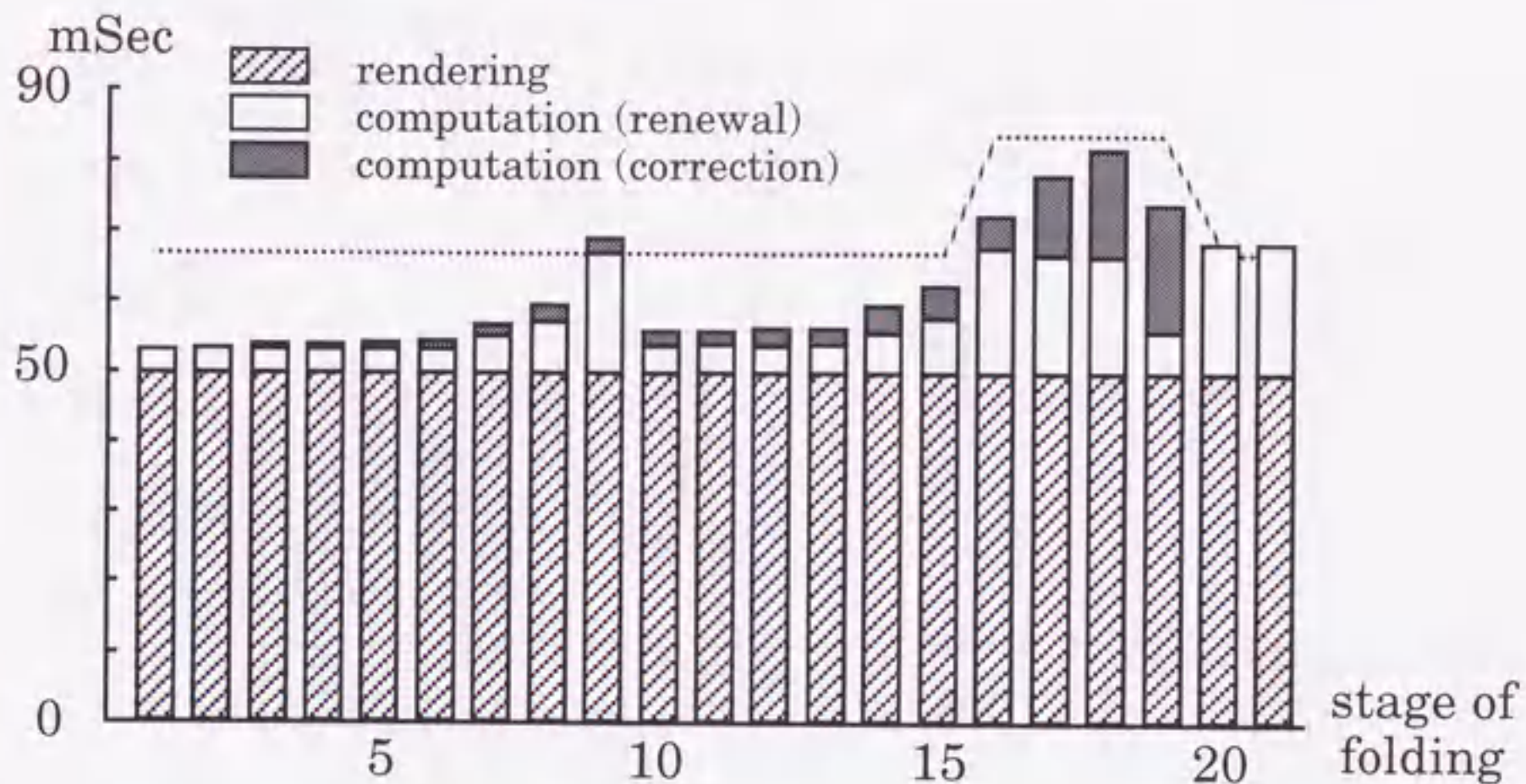


Fig.2-19 Computation time and rendering time in the case of folding paper crane.

図 2-19 折り鶴を作る過程の計算時間と描画時間



83ms である。従って、折り鶴作成過程では全体を通して、リアルタイム性が十分保証されていることがわかる。

これらの結果より、現在のシステムの対話性は現実的な折りの範囲では十分満足のものであると言える。

### 3) 「曲げ」操作の場合

曲げ操作では通常の計算処理に加え曲面形状を得るための計算時間が必要となる(図2-20)。この時間は断面形状を決定する頂点列の数およびエネルギー関数を収束させるための計算の反復回数に比例する。追従性を高めるためには収束の反復回数は多い方が良いが、なめらかな動画を生成するためには全処理時間は 100ms 以下でなければならない。従って、現在は頂点数 15 の場合で、反復回数を 50 に設定している。

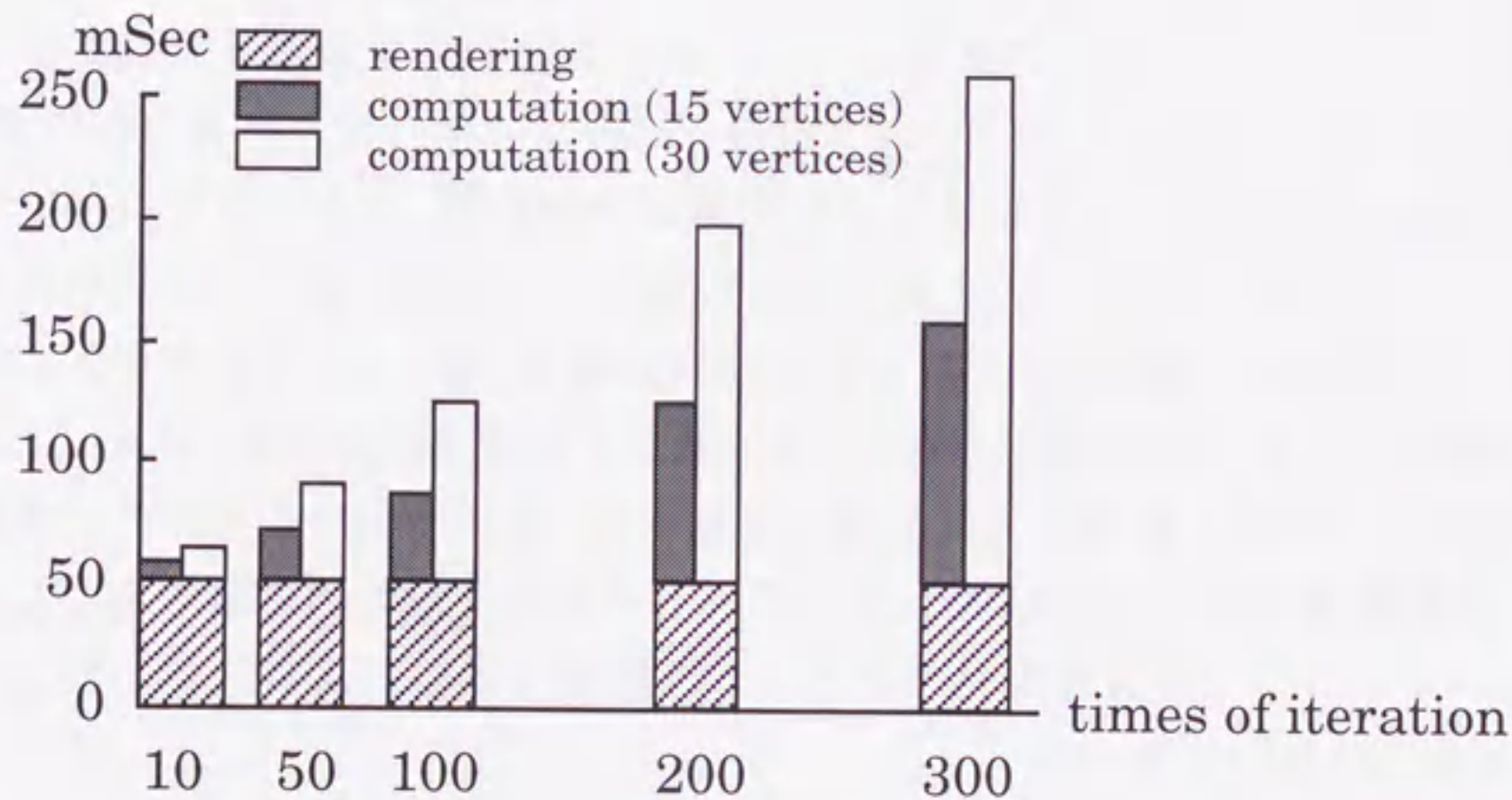


Fig.2-20 Computation time and rendering time to form the shape of curved face.

図 2-20 曲面形状を得るために必要な計算時間と描画時間

## 2.7 むすび

本章では、多重に折り重なるという性質を有する紙に対する、リアルタイムの折り操作が可能な折り紙のシミュレーションシステムについて述べた。紙面の重なりや辺の共有の幾何学的な性質を二分木リストを用いて効率よく記述する方法と紙の自然な丸みを曲げ応力という紙のもつ物理的な性質に基づいて生成する方法を組み合わせた紙のモデルは、平面素材である紙を加工し、折り重なった平面と曲面により自由な形状を表現するのに必要かつ十分なものであるといえる。また、頂点位置の自動修正はマウスによる座標入力の曖昧な部分を補うための仮想世界の付加的法則として有効に機能した。

本システムは、基本コンセプトが実現されたばかりの段階なので、今後解決すべき課題が数多く残されている。現在のシステムでは、1頂点の移動に基づいて折り操作を実現しているため、折り方の種類がかなり限定されてしまっている。また、折り鶴過程におけるいわゆる「袋折り」についても自然な動作で実現されてはいない。今後は、データグローブ等のより詳細な情報を入力できるデバイスを導入し、自然な動作での「袋折り」や、2つの面の隙間に他の面の角を差し込む、紙風船を膨らます等のより複雑な操作にも対応していく予定である。また、これに合わせて、弾性等の計算コストのかかる物理的性質を紙のモデルに取り入れることも検討していかなければならない。現段階では紙の厚みが考慮されていないが、実際の折り紙には紙の厚みをうまく利用した作品が数多くあるので、これについてもうまく表現することを考えたい。「曲げ」操作についても、現在は曲面の形状が円柱面に限定されているが、より自由な形状を可能にするためには円錐面やそれらを組み合わせた形なども加えるべきである。現段階では計算コストを省くために、紙面同士の重なりによる干渉以外は衝突判定を行っていないが、より精密な対話操作を実現するためには、これらについても実現していかなければならない。

## 参考文献

- 1) 安居院 猛, 竹田 昌弘, 中嶋 正之: 条件付きキーフレームアニメーション, 情報処理学会 CG 研究会資料, 1-2, 1981.
- 2) 内田 忠, 伊藤 英則: 折り紙過程の知識表現とその処理プログラムの作成, 情報処理学会論文誌, 32 (12), pp.1566-1573, 1991.
- 3) 小森章弘, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 折り紙の会話型シミュレーションシステム, 情報処理学会グラフィックスと CAD 研究会資料, 50-9, 1991.
- 4) 紺野晃弘, 板橋秀一: パソコンによる折り紙処理, 情報処理学会第44回全国大会講演論文集, 2-353, 1992.
- 5) Kergosien Y, Gotoda H, Kunii T: Bending and Creasing Virtual Paper, IEEE Computer Graphics & Applications, 14 (1), pp40-48, 1994.
- 6) Special issue on Origami, 1 and 2, Symmetry: Culture and Science, 5, No.1 and No.2, 1994.

## 第三章 弾性物体操作シミュレーションシステム

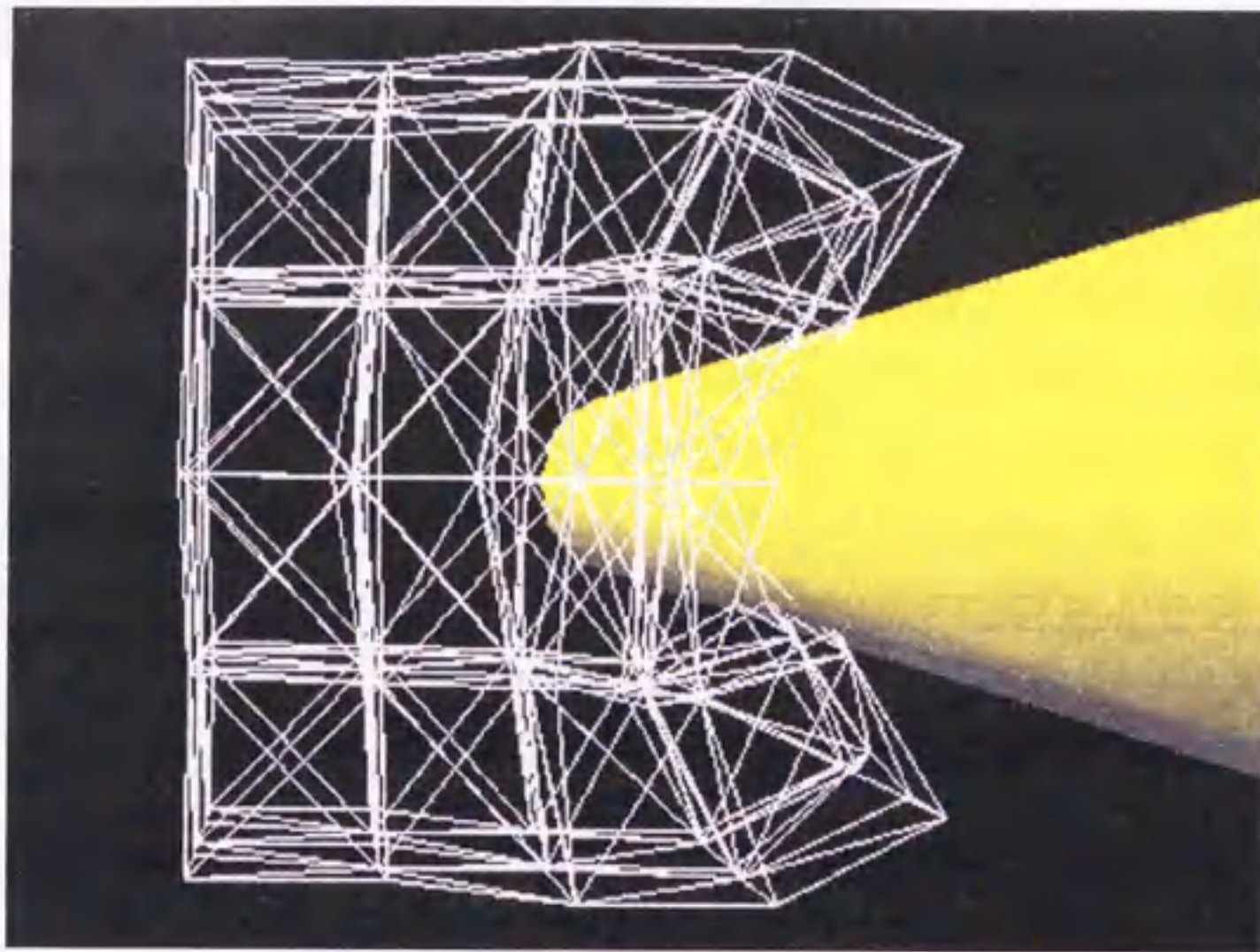
### 3.1 まえがき

実世界に存在する物理的性質のうち「弾性」はほとんどの物体が保有している性質であり、物理シミュレーションの分野の研究では頻繁に取り上げられてきた性質の一つである。本章では、物理的性質に基づいて表現される弾性物体に対するリアルタイムでの操作が可能な対話シミュレーションシステムについて述べる。本研究は弾性物体を道具や操作の対象として用いる、軟部組織の外科手術や球技スポーツなどの訓練用のシステム等への応用が可能である。

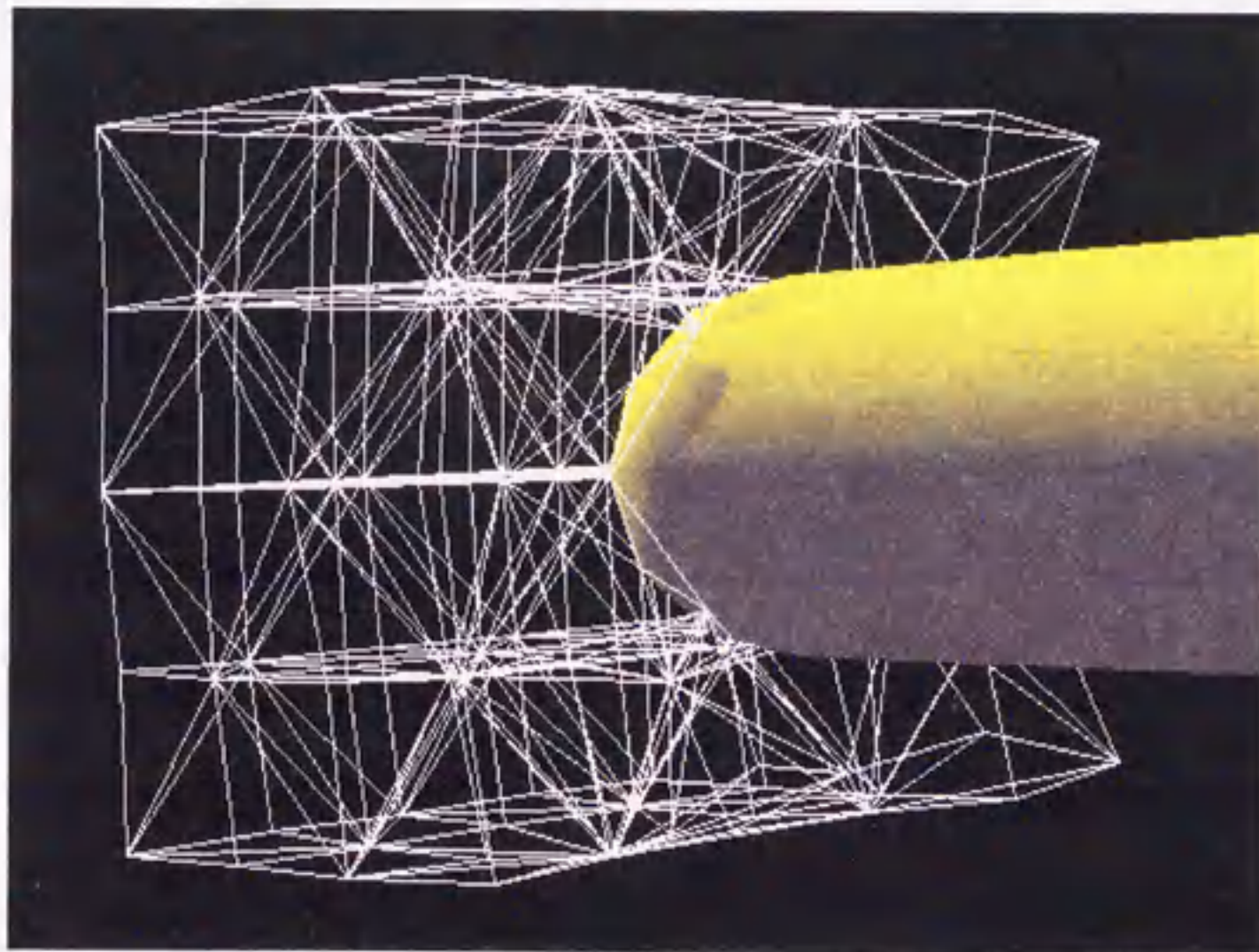
#### [従来の研究]

様々な物体運動をアニメーションとして表現するための主な手法として、物体の状態をパラメータの関数として定義し、パラメータの変化により運動を生成する方法がある。パラメータの取り方や変化のさせ方を、実際の物体が従う物理法則に基づいて決定すれば、物体の正しい動きを容易に得ることができる。現在までに、これに関する様々な基礎的研究が行われ<sup>1-7</sup>、様々な物体運動への応用が試みられた<sup>8-10</sup>。Norton ら<sup>8</sup>は、弾性モデルを応用することにより物体が粉砕する際の運動を見事に実現した。また、Carignan ら<sup>9</sup>は人体に衣服をフィットさせる方法を提案した。Breen ら<sup>10</sup>は、繊維のもつ物理的特性に基づいて布のモデルを生成している。

これらの研究の目的は、リアルな形状や動きをもつ物体運動のアニメーションを得るために、物理学に基づいたその動的シミュレーション手法を確立することであるため、計算コストのかかるこれらの物理モデルを対話システムへ応用しようという試みは今まで行われなかった。しかしながら計算機の演算処理能力の飛躍的な向上により、高度な物理モデルの計算をリアルタイムまたはそれに近い速さで実行できる環境が現実的になってきた。アニメーション生成用モデルを対話システムに応用する際には、アニメーションが決まった物体運動を生成するのに対し、対話システムでは入力操作により物体の運動が変化してしまうので、システム的设计においてより多くの事柄や場合を考慮しなければならない。



(a) Hitting by the cylindrical surface



(b) Thrusting by the spherical surface

Fig.3-1 Examples of manipulation for elastic objects.

図 3-1 弾性物体の操作の例

## 3.2 システムの概要

本システムはマウス等により制御される仮想の剛体マニピュレータにより3次元仮想空間内の弾性物体を力学的干渉により操作することができる。マニピュレータが及ぼす力学的干渉に対する弾性物体の動的応答は物理学に基づいた数値的解法により高速に計算され、CG映像としてリアルタイムで生成される。これにより操作者は仮想空間内において棒で弾性物体を打つ、突くといった操作を実際に近い動作で実行することが可能となる(図3-1)。

一般に、弾性物体の動的シミュレーションは、有限個の質点とそれらを結合するバネにより構成される質点-バネモデルに対して、オイラー法と呼ばれる数値的解法により、時間軸上の離散化された時刻における質点の位置を逐次的に計算することにより行われる。この方法では、強い跳ね返りにおいて各バネの端点に過大な力が加わると、弾性物体を構成する質点-バネ格子の状態がその付近で局所的に不安定になるという問題が生じることが本研究室の過去の研究により確認されていたが<sup>1)</sup>、この問題に対する踏み込んだ調査は行われておらず、具体的な解決策も考え出されていなかった。今後弾性物体のモデルを、より実際の物体に近づけるためには、このような場合にも対処できるようにモデルを積極的に改良していくことが望まれる。本研究ではこれについても、弾性物体の一部分に過剰に加えられた力をバネのとりうる弾性エネルギーの上限に基づいて物体内部に分散させることによりこの問題を回避する方法を提案している。

これらの詳細については、以降の節で逐次述べていく。3.3節では、本システムで実現すべき操作環境についての枠組みを与え、それらにおいて必要となる弾性物体の動的シミュレーションの方法や跳ね返りのモデル等について説明する。3.4節では、弾性物体に過大な外力が加えられた場合にも物体の状態が不安定な状態に陥りにくいように改善されたバネのモデルを提案し、実際のシミュレーション実験により、バネモデルの有効性を示す。3.5節では、システムの対話性について述べる。特に、現在のグラフィックスマシンの性能でリアルタイムシミュレーションが実現可能な弾性モデルの規模、すなわちバネや質点の数および弾性の度合いを示すバネ定数のパラメータ範囲を具体的数値で与えると共に、仮想空間の時刻を実時刻に一致させるためのこれらのパラメータの決定方法についても述べる。また、システムの実現例とシステム全体についての考察を与える。

### 3.3 仮想環境のモデル

剛体と比較して弾性物体は、その形状が外力の加わり方により多様に変化するため、打つ、押す、曲げる、捻る、伸ばす、切る等の様々な操作が考えられるが、今回はこれらのうちで最も基本的な、物体に働く力の作用点が1つである「打つ」、「突く」およびそれらの動作が遅い場合である「押す」操作のみについて実現する。また、本研究の目的は物理学に基づいた仮想環境の生成であるので、対話操作の実現に必要なマニピュレータと弾性物体間の相互作用は力学的干渉に基づいて記述されるべきである。以上で述べた枠組みに基づいてシステムを実現するためには次にあげる項目がすべて定義されなければならない。

- 1) 仮想マニピュレータの形状と外部コントロールデバイスによる制御。
- 2) 弾性物体を表現するための微細構造モデルと、物体の動きを生成するための動的シミュレーションの方法。
- 3) 弾性物体とマニピュレータや床との衝突判定、および跳ね返り等の衝突処理のモデル。
- 4) マニピュレータと弾性物体を含む仮想環境。

#### 3.3.1 マニピュレータの定義と制御方法

本研究の目的は高度な操作を実現するための複雑な衝突判定のアルゴリズムを開発することではないので、マニピュレータの形状は衝突判定等のための計算処理の負荷が少ない円柱や球の組み合わせによって構成されるものとする。ここでは、円柱の両端に半球をつけた、角が丸い棒を考える(図3-2)。棒の長さや半径はキー入力により変更できるようにした。

マニピュレータの制御はマウスとボタンを用いて行われ、空間内での平行移動と水平面内での回転が可能である。スクリーンに平行な上下左右方向の移動はマウスカーソルにより制御される。奥行き方向についてはマウスの3つのボタンのうち両側の2つのボタンにより行われる。回転についてはキーボード上の2つのキーにより制御される。同様にして、回転の中心位置が変更できる。

現在は、仮想マニピュレータの制御にマウスを用いているが、これは本システムをVRシステムの独立したサブシステムとして標準のワークステーション環境のみで動作するよう考慮したためである。従って、将来的には、3Dマウスやデータグ

ローブ等を導入して、マニピュレータのより快適な操作が可能なシステムへの向上を目指していく予定である。

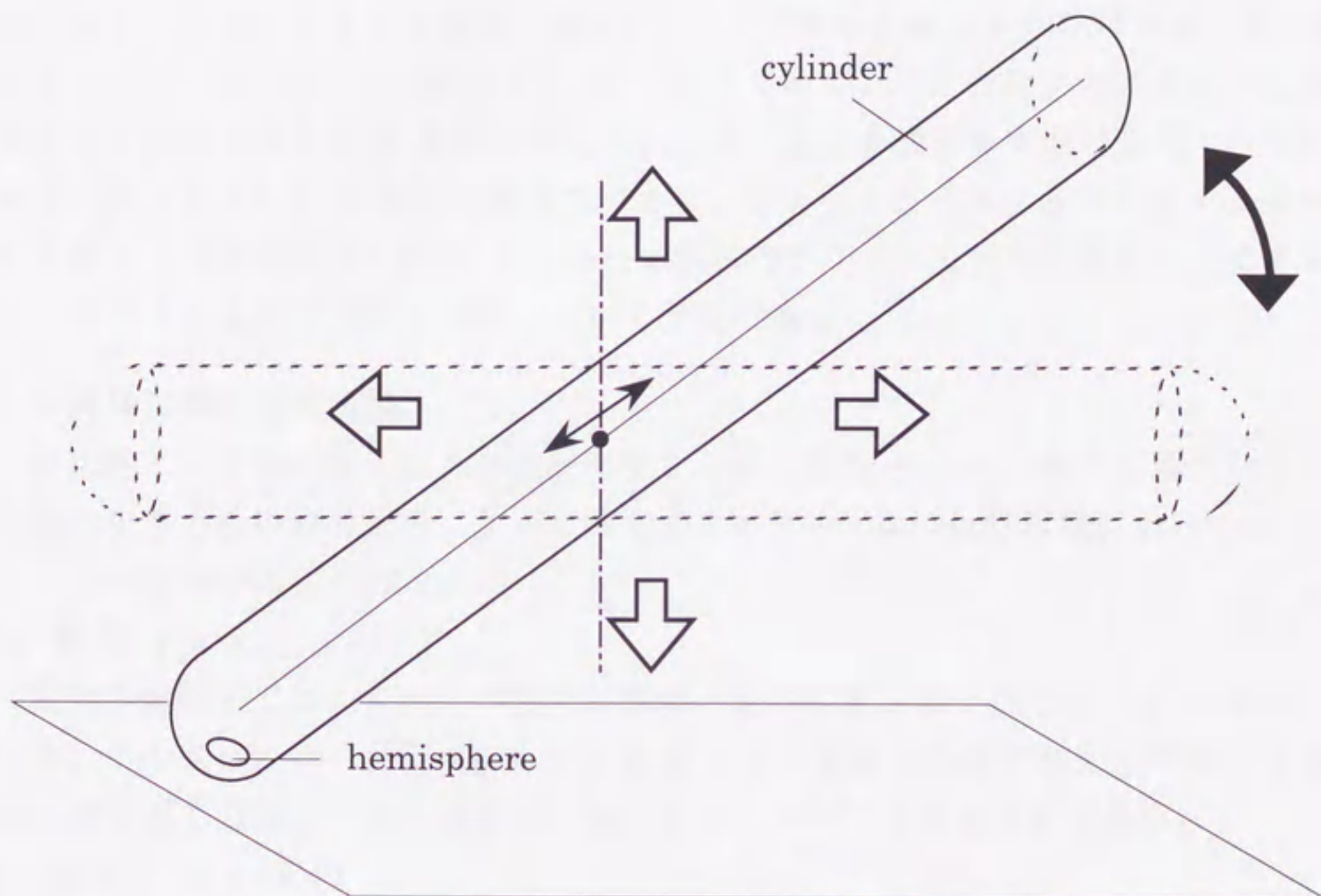


Fig.3-2 The cylindrical manipulator like a stick. It is moved up and down and left to right on the screen, and up and down to the depth by a mouse and rotated by buttons. The centre of rotation is slid along the central axis.

図3-2 棒状の円柱型のマニピュレータ。マウスによりスクリーン上の上下左右と奥行き方向への平行移動が可能である。回転の中心は円柱の軸に沿って変更できる。



### 3.3.2 弾性物体の構造モデルと動的シミュレーション

#### 1) 有限要素モデル

実際には連続体とみなされる物体でも、コンピュータの数値シミュレーションにおいては有限個の要素によりモデル化される。本システムにおいても、弾性物体は有限個の質点とそれらをつなぐ質量のないバネとの組み合わせにより表現される。バネの配置には様々な方法が考えられるが、通常、立方格子の辺にあたる部分の全部に加え、各面の2本の対角線(図3-3左下)と重心を通る4本の対角線(図3-3右下)のうちのいくつかに配置する。ここでは実験により比較的少ない本数で最も効果的な結果が得られた、各面にそれぞれ1本と重心を通る4本の対角線すべてに配置した(図3-3上)。今回は等方性があり、ボクセルデータに直接対応する立方体を格子の基本形状としたが、今後は自由形状のポリゴンモデルに直接対応できるようなバネの配置の方法も検討していく予定である。

#### 2) 物体に働く力の種類

実世界では物体に働く様々な力が存在するが、質点-バネモデルで表現される弾性物体を重力場の中で剛体によって操作する本システムの仮想環境においては、以下のような力が考えられる。

##### a) 重力 ( $F = m g$ )

重力の影響下では、すべての質点に常時一定の大きさの下向きの力  $F$  が働いている。その大きさは、各質点のもつ質量  $m$  と重力定数  $g$  の積で与えられる。 $g$  の値は実世界では常に一定であるが、仮想世界においては変更可能である。

##### b) 弾性力 ( $F = -k x$ )

フックの法則に従い、バネの長さの自然長からの変位  $x$  に比例した弾性力  $F$  がバネの両端点に働く。 $k$  はバネ定数と呼ばれる物体に固有の定数であり、弾性物体の固さに相当する。

##### c) 減衰力 ( $F = -D v$ )

バネの振動を減衰させるために、バネの両端点の相対速度  $v$  に比例した運動に対する抑止力  $F$  がバネの両端点に働く。 $D$  は減衰定数と呼ばれ、振動の収まり具合に相当する。

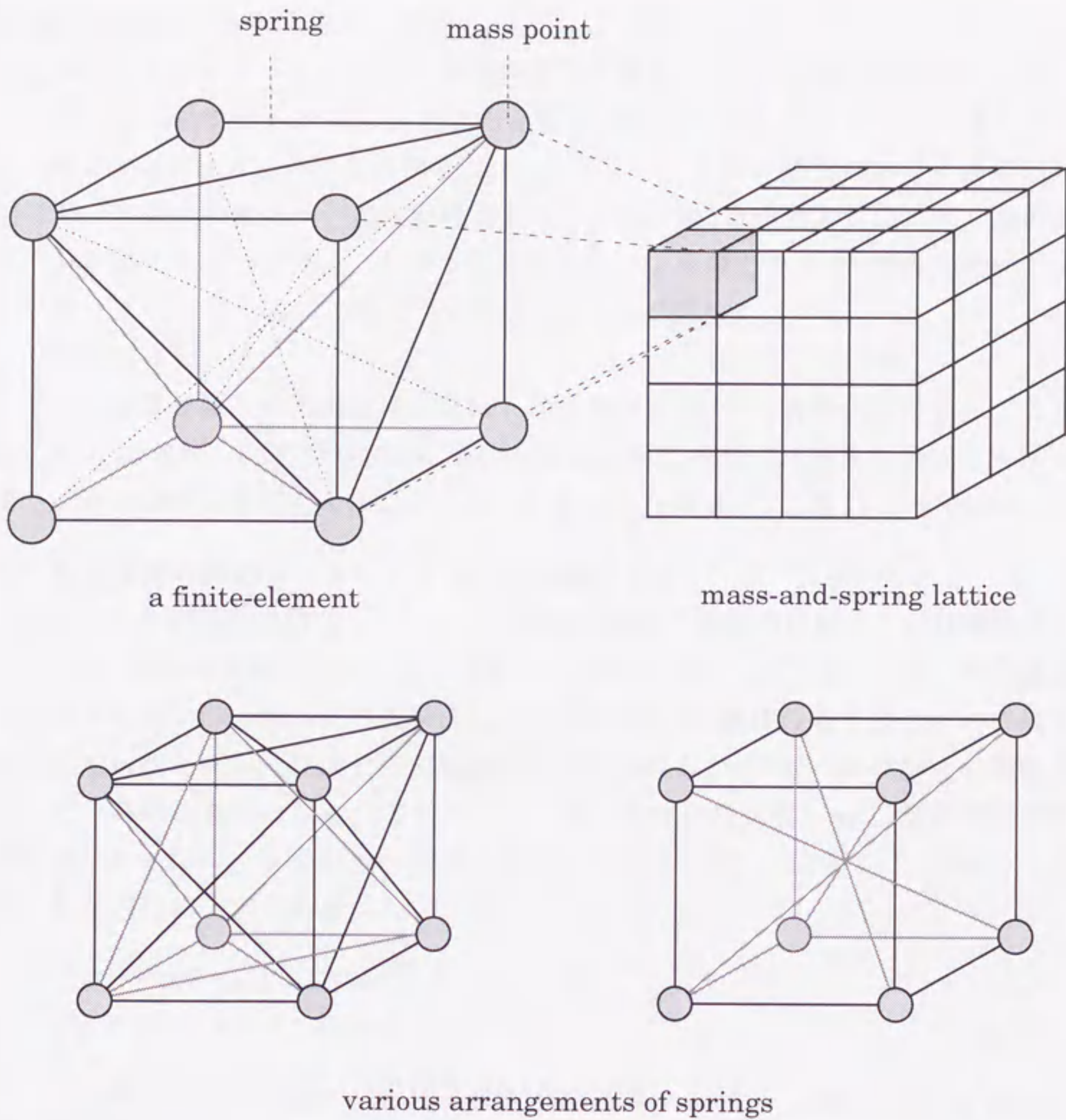


Fig.3-3 Model of microstructure of an elastic object. Mass points are put on the vertices of lattice and springs are put on all the edges and some of diagonals.

図 3-3 弾性物体の微細構造モデル。質点が格子の頂点に、バネが格子のすべての辺といくつかの対角線上に配置されている。

## d) 衝突過程における反発力

質点とマニピュレータや床等の剛体表面との衝突時には、質点の剛体内への侵入に対する空間的制約のために、これら2物体の間に反発力が発生すると考えられる。一つのオーソドックスな方法として、シミュレーション過程における各離散時刻において質点の剛体への侵入が検出されたときには、その侵入量に比例した力を両物体に加える方法がある。この方法は結果的には反発力を b) の弾性力と同じように扱うことができる。これについては 3.3.3 節で詳しく述べる。

e) 摩擦力 ( $F = \mu N$ )

質点と物体表面との衝突過程においては反発力に加えて、物体表面が発生する垂直抗力  $N$  に比例した摩擦力  $F$  が、質点と物体表面との相対速度を抑制する方向に働く。 $\mu$  は摩擦係数である。ここでは、垂直抗力  $N$  は d) の反発力としている。

## 3) 物体運動の動的シミュレーションの数値的解法

質点とバネが多重に結合したモデルの運動方程式を解析的に解くことは容易ではない上に、物体間に衝突が生じると方程式の構造が変化してしまうので、物体運動の動的振る舞いは一般に数値的解法により求められる。物体の各質点において局所的に立てられた運動方程式を時間軸方向に差分近似した式から、時間軸上の離散化された各時刻における質点の運動が得られる。各質点の質量を  $m$ 、離散時間の間隔を  $\Delta T$  とすれば、各時刻  $T$  における各質点の速度  $V(T)$ 、位置  $P(T)$  は以下の式により逐次的に決定される。

$$V(T + \Delta T) = V(T) + F(T)/m \cdot \Delta T, \quad (3.1)$$

$$P(T + \Delta T) = P(T) + V(T) \cdot \Delta T. \quad (3.2)$$

式 (3.1) は、各離散時刻  $T$  における各質点の速度  $V(T)$  から、微小時間  $\Delta T$  間は等加速度であるという仮定のもとで  $\Delta T$  後の速度  $V(T + \Delta T)$  を得るものである。この際の加速度は、質点に働く力の総和  $F(T)$  を質点の質量  $m$  で割った、時刻  $T$  における瞬間のものを用いる。同様に式 (3.2) により、時刻  $T$  における質点の位置  $P(T)$  が微小時間内では速度  $V(T)$  で等速度運動をすると仮定して更新される。

この方法はオイラー法と呼ばれる微分方程式の数値解法による近似解の求め方のうちで最も素朴な解法に基づいているが、物体の運動の特性を考慮して差分間隔を決定できれば十分良い近似解が得られる。運動の形態が基本的に単振動である弾性

モデルの場合は、 $\Delta T$  をバネの振動の周期に対して十分小さくとれば良い(3.5.2 節参照)。

### 3.3.3 衝突判定と跳ね返りのモデル

弾性物体とマニピュレータや床等の剛体との衝突時における跳ね返りの力学モデルは、物理学に基づいた本システムの対話操作を実現する上で重要な要素となる。マニピュレータを弾性物体に押しつけたり、弾性物体が床にぶつかった際には物体間の干渉力として反発力や摩擦力が生じる。シミュレーション過程においてこれらの力を考慮することにより、マニピュレータで弾性物体に力を加えて変形させたり、押し返したりする操作が実現される。跳ね返りの現象は、弾性物体を構成している各質点と剛体表面との微視的な干渉を巨視的に見た挙動であると仮定されるので、本節では、跳ね返りモデルの核心として、質点と剛体表面間に発生する反発力の決定方法について述べる。

#### 1) 衝突判定

重力や弾性力とは異なり、反発力や摩擦力は各質点と剛体物体が干渉している間のみ発生するので、なんらかの干渉判定が必要となる。これらの力が弾性物体を構成している質点にのみ働き、なおかつ質点が剛体内に侵入している間のみ発生すると仮定すれば、干渉判定は剛体表面の形状である平面、球面及び円柱面に対する質点の位置関係の判定の組み合わせで実現できる。平面に対する判定は平面の方程式に質点の位置の座標を代入することにより行われ、円柱や球との判定は、円の回転軸や球の中心と質点との距離を円柱や球の半径と大小比較することにより行われる。

#### 2) 剛体表面の弾性層

弾性物体と剛体間の跳ね返りの強さには、これら両方の物体の性質が関係すべきである。ここでは、剛体側の強さを表現するための要素として、剛体表面に厚さが一定の薄い弾性をもつ層を仮定する。具体的には、動的シミュレーションの各更新過程で弾性層内に侵入した質点を探索し、それらの質点と層の下面との間にバネを仮想的に配置する(図3-4)。仮想バネの自然長を層の厚さと等しくとれば、質点の弾性層への侵入量に比例した反発力が質点と剛体表面との間に生じることになる。

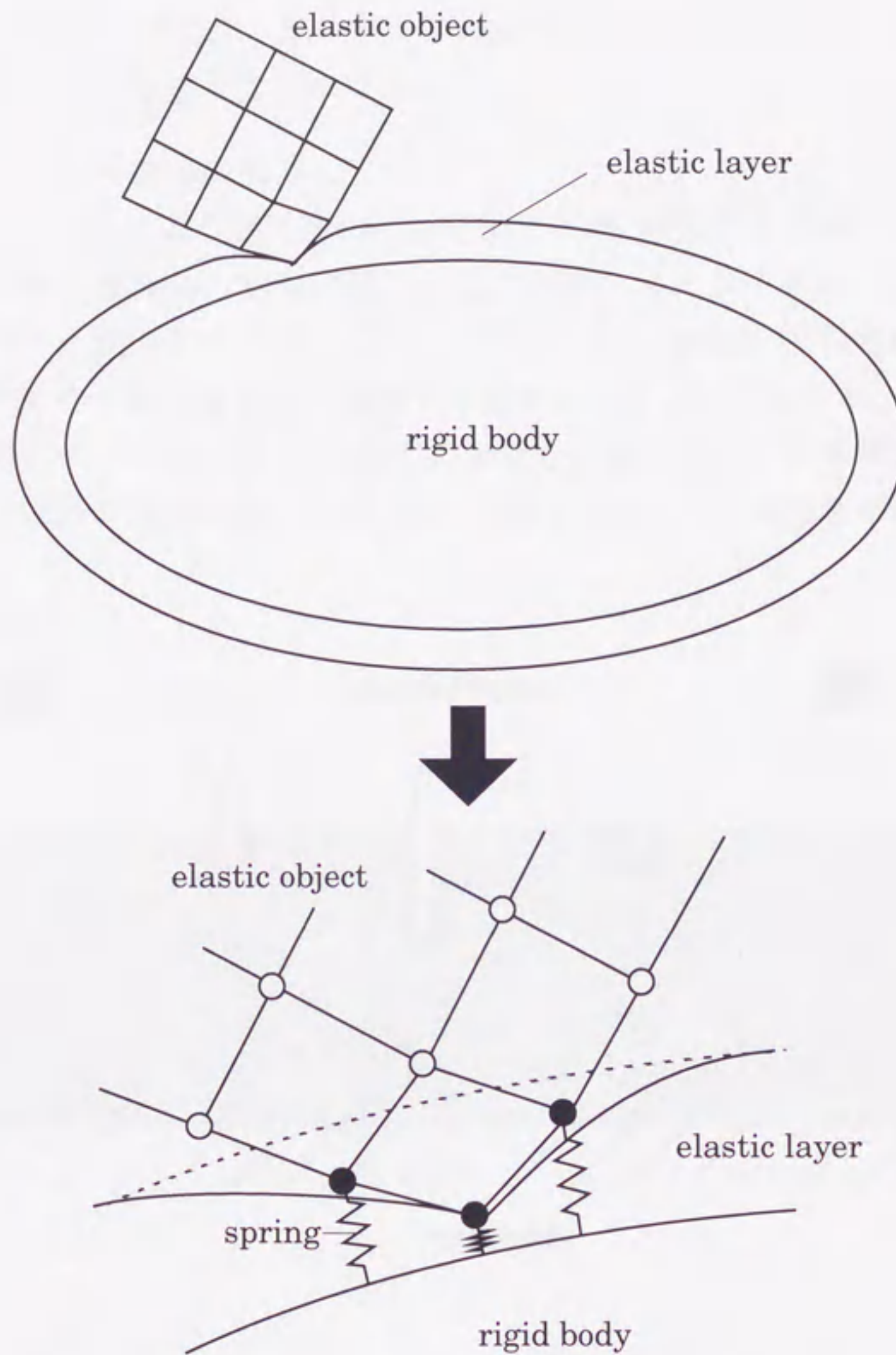


Fig.3-4 Model for collision between an elastic object and a rigid body. We assume that an elastic layer covers the surface of the rigid body from which rebound force is generated against mass points by virtual springs.

図 3-4 弾性物体と剛体との衝突モデル。剛体表面には弾性層が仮定され、これに進入した頂点には仮想バネによる跳ね返りの反発力が働く。

(図3-5)。このモデルでは、剛体側の跳ね返りの性質は仮想バネの弾性係数を変更することにより制御することができる。

### 3) マニピュレータへの反力

マニピュレータにより弾性物体に力を加える際、弾性物体がマニピュレータから受けた反発力と摩擦力の総和に等しい反力がマニピュレータにも働く。フォースフィードバック機構をもつデータグローブ等を用いた場合、操作者はこの反力を体感し自分の力をそれに合わせて調節して発生させることができる。入力デバイスにマウスを用いている現段階では、反力の大きさに応じてマウスの移動量を抑制することにより反力を入力操作に反映させている。これにより操作者が反力の全く感じ

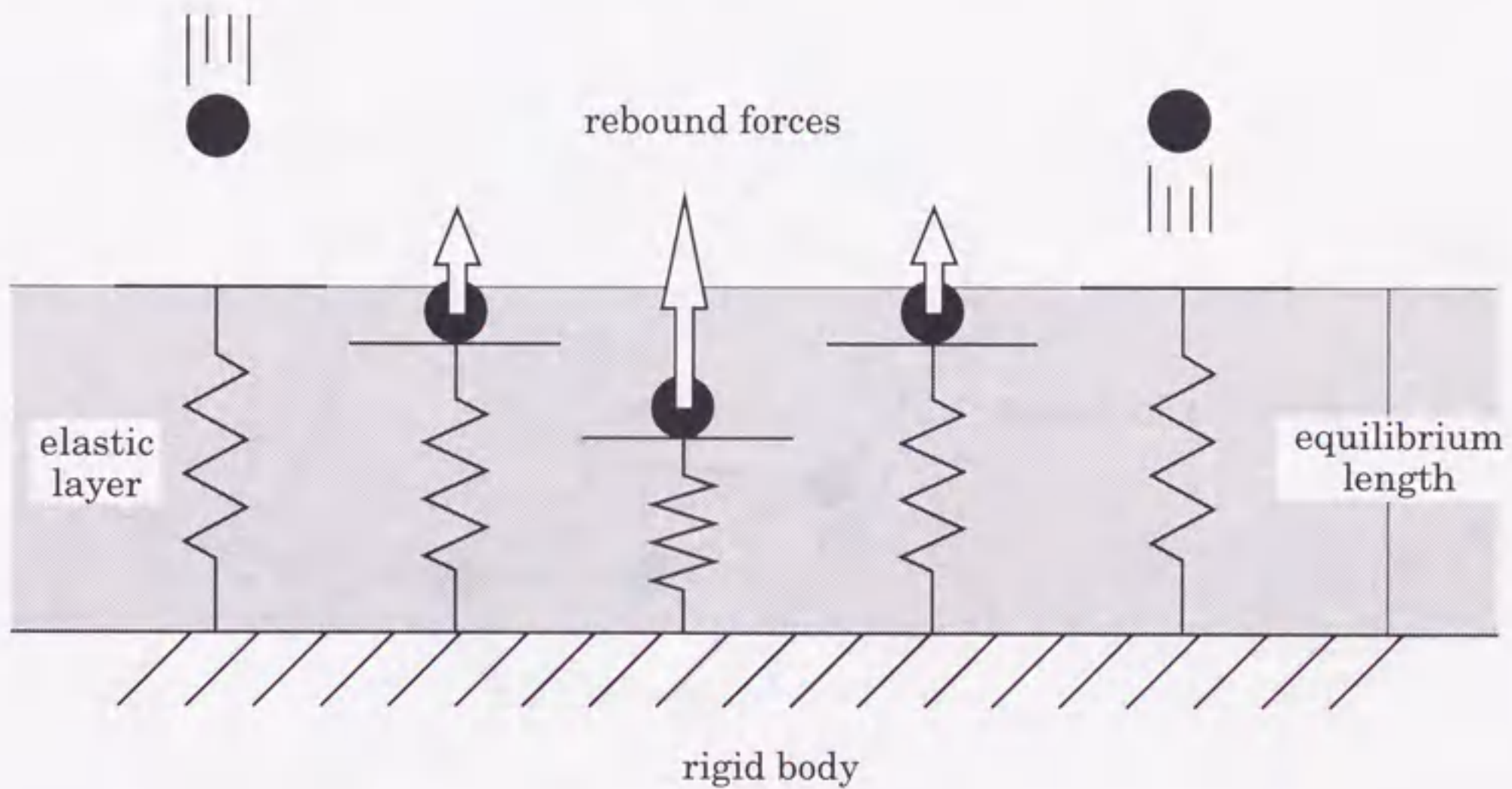


Fig.3-5 Collision of a mass point with the elastic layer. The rebound force is generated in proportion to the intersecting depth between them if the equilibrium length of the virtual spring is equal to the thickness of the elastic layer.

図3-5 質点の弾性層に対する衝突。仮想バネの自然長を弾性層の厚さに等しくすれば、質点に働く反発力は質点の層への侵入量に比例する。

られないマウスを不用意に大きく動かした場合に、マニピュレータと弾性物体の間に生じる反発力が極端に増大することを抑止することができる。

#### 4) 弾性層内にある頂点の表示

剛体表面の弾性層は、跳ね返り計算のモデルとして仮定したものであるが、この層が厚くなると、衝突時における弾性物体の剛体内への侵入が視覚的に無視できなくなる。そこで、跳ね返りの計算のためのモデルとは別に表示のためのモデルを考える。具体的には、弾性層内にある計算用モデルの頂点の位置は表示用モデルにおいては弾性層の上面からある範囲の部分に線形に写像される(図3-6)。これにより視覚的には頂点の侵入量がある値以下に制限することができる。

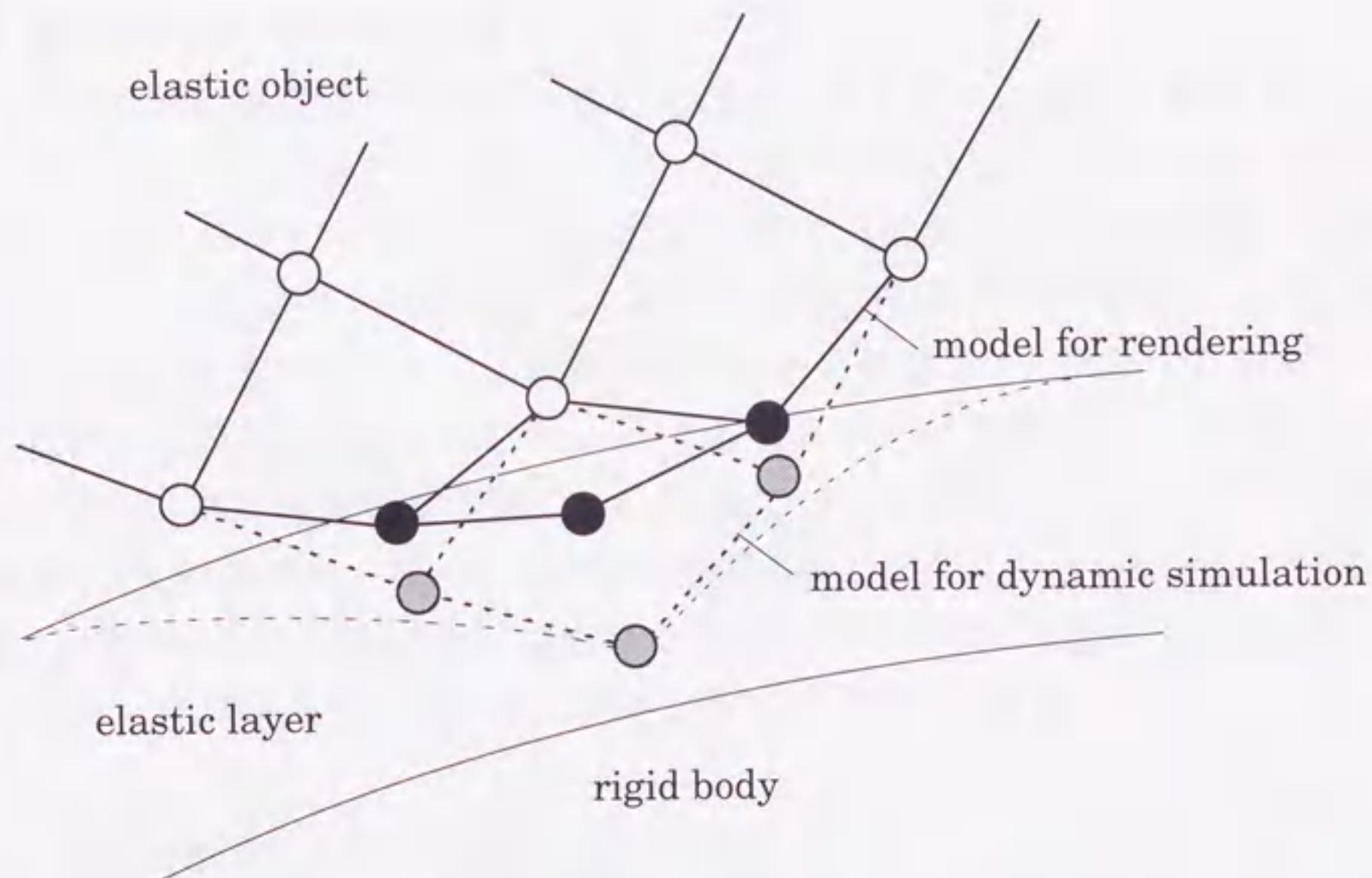


Fig.3-6 Two kinds of model for dynamic simulation and rendering. Mass points deeply intersecting with the elastic layer are linearly mapped around the upper surface of the layer in rendering.

図3-6 力学計算とレンダリングのための2種類のモデル。弾性層に深く侵入している質点はレンダリングにおいては層の表面付近に線形写像される。

### 3.3.4 仮想環境の設定

これらのフレームワークに基づき、仮想環境を次のように設定する。本研究の目的は計算コストのかかる物理モデルを対話操作のシステムへ適用することであるため、ここではリアルタイム性を考慮した基本的なものとして、剛体平面で構成される十分な大きさの立方体の部屋の中に、弾性物体とマニピュレータが1個ずつ存在する場合を考える。弾性物体が環境から受ける外力は重力、弾性物体の内力としては弾性力と減衰力、弾性物体の剛体との衝突時においては反発力と摩擦力があるが、次節の実験においては提案した新しいバネモデルの有効性を明示するために、バネの減衰力と衝突時の摩擦力は除いた。

## 3.4 弾性物体モデルの改善

自然界の物理現象等を計算機を用いて表現しようとする際に、数値シミュレーションのための近似モデルが適当でないと、精度の良いシミュレーション結果が得られないだけでなく、時には実際とはかけ離れた異常な結果に陥る場合もある。3.3節で述べた剛体面との跳ね返りを想定した弾性物体のモデルでは、バネの伸びとバネが発生する弾性力との関係が線形であると仮定していることに起因して、跳ね返りがある程度以上強くなると、バネの振幅が自然長を越えてしまい結果的に弾性物体が局所的に不安定な状態になる。本節ではこの問題に対する一つの具体的解決策として、弾性エネルギーに基づいて振幅に制約を与えた新しいバネのモデルを提案し、そのモデルが原理的に振幅の発散を生じないことを証明し、実際のシミュレーションにおいても有効にその機能を果たすことを示す。

### 3.4.1 線形特性をもつバネの振動発散の問題

弾性物体と剛体面との衝突においては弾性物体の表面付近に配置されたバネの端点に反発力が加えられるが、この力は各質点と剛体面との距離により異なるので、バネの両端点に加えられる力には差が生まれ、これがバネの振幅を増大させる。バネが正しく単振動を続けるためにはバネの振幅はバネの自然長以下である必要があるが、跳ね返りが強くなれば振幅が自然長を超える場合も起こりうる。そのような場合においてはバネの両端の質点の位置が互いに入れ替わるという現象が生じ、最



悪の場合には新しい安定状態に陥り、再び元の状態に戻らなくなる (図3-7)。対話システムでは弾性物体は速度をもつマニピュレータと頻繁に衝突するので、この現象はより頻繁に生じることになる。

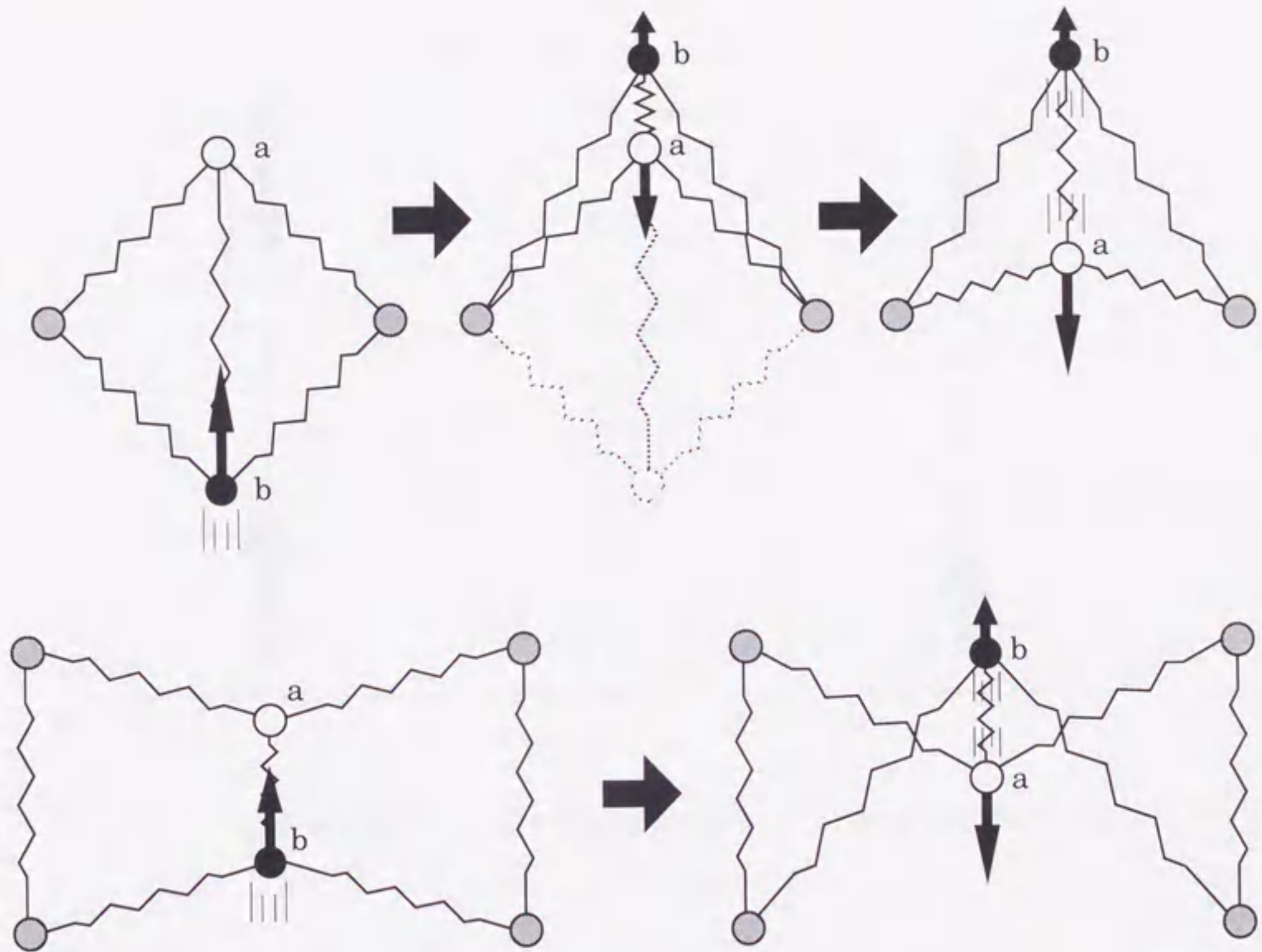


Fig.3-7 Exchange of places of mass points in a body. It occurs when one of mass points directly connected is accelerated too rapidly. For superfluous acceleration of the mass b (a black point) by external force, the spring whose end points are the mass a (a white point) and the mass b is reversed.

図3-7 物体内における質点位置の入れ替わり。バネの両端のうち的一方のみが大きく加速された場合に生じる。質点b (黒) が外力により過剰に加速された結果、質点a (白) および質点bを両端とするバネに反転が生じている。

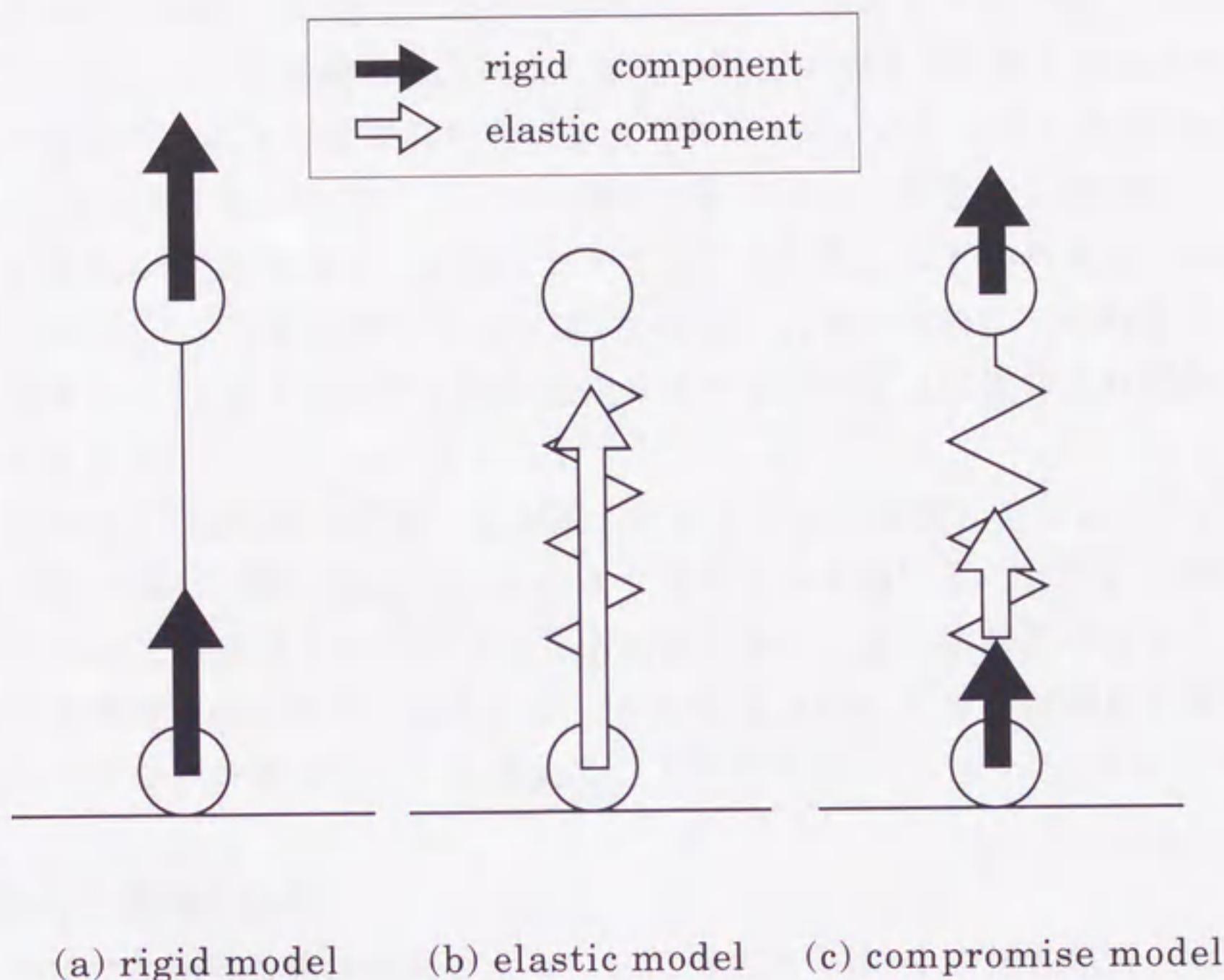


Fig.3-8 Three kinds of models having rigidity and elasticity. In the collision of elastic bodies, response force affects the limited part of the bodies, while it is distributed to the whole of bodies in the case of rigid bodies. The model (c) is a compromise model between them.

図 3-8 剛性と弾性をもつ 3 種類のモデル。剛体モデルでは衝突の反発力がモデル全体に加わるのに対し、弾性モデルでは局所的に加わる。(c) はそれらの中間モデルである (折衷モデル)。

## 3.4.2 剛性をもつバネモデル

図3-8に示すのは、2つの質点を伸縮のない剛体線で結んだ剛体モデル (a) と、線形なバネで結んだ弾性モデル (b)、およびそれらの中間的な性質をもつモデル (c) である。数値シミュレーションの過程において、これらの各モデルの一方の質点のみが床面衝突し反発力を受けた場合を考える。(a)の剛体モデルでは、一方の質点に発生した反発力は剛体線の抗力により瞬時に他方の質点に伝搬されるため、反発力は2分割されて両方の質点に均等に加えられている。これに対し (b)の弾性モデルでは、反発力は中間に位置するバネの弾性エネルギーへの蓄積を経て他方の質点へと伝搬されるので、衝突した瞬間においてはこの反発力は下端の質点のみにすべて加えられる。このため弾性モデルでは、反発力が大きい場合に下端の質点のみが極度に加速され、下端の頂点が上端の頂点を追い越して質点位置の入れ替わりという現象が生じる。

この現象は、下端の質点のみに力が加えられることに起因しているため、下端に加わる力の一部を上端に加える (c) のようなモデルを用いることにより解消できる。モデル (c) では両端点に加わる力を両端点に等しく加わる剛性の成分と下端のみに加わる弾性の成分に分けることができるので、(c) のモデルは剛体と弾性体の中間的なモデル (折衷モデル) と考えることができる。

## 3.4.3 剛性と弾性の比率

前節で述べた剛性と弾性の両方をもつ折衷モデルでは、その剛性成分と弾性成分の比率を与える必要があるが、バネの振幅の発散を押さえることが目的であることから、振幅が発散しないという条件の下で剛性の比率を最小とするのが望ましい。振幅が発散しない条件は、バネのもつ振動エネルギーの総和がバネのとりうる弾性エネルギーの最大値以下となることである。バネの両端点の質点の質量を  $m$ 、両端点の速度ベクトルをそれぞれ  $v_1, v_2$ 、バネ定数を  $k$ 、バネの長さを  $l$ 、バネの自然長を  $L$  とすれば、この条件は不等式 (3.3) で表される。

$$\frac{1}{2}m|v_2 - v_1|^2 + \frac{1}{2}k|l - L|^2 < \frac{1}{2}kL^2. \quad (3.3)$$

左辺の第1項がバネの両端の相対速度の大きさ  $|v_2 - v_1|$  に関する運動エネルギーを、第2項がバネの変位  $|l - L|$  に関する弾性エネルギーを、右辺がバネの変位がバネの

自然長と等しくなった時、すなわちバネが伸び（縮み）きった時のバネの弾性エネルギーを示している。式 (3.3) より以下の条件式が得られる。

$$|v_2 - v_1| < \theta \quad \left( = \frac{k}{m} \sqrt{l(2L-l)} \right). \quad (3.4)$$

これは、バネの両端の相対速度の大きさ  $|v_2 - v_1|$  がバネの現在の長さ  $l$  によって決まるあるしきい値  $\theta$  以下でなければならないことを示している。

従って、剛性と弾性の比率は、不等式 (3.4) を満たす、すなわちバネの両端の相対速度が  $\theta$  を超えないという条件の下で剛性の比率を最小化するという操作により求めることができる。

#### 3.4.4 シミュレーションにおける実現方法

折衷モデルではバネの両端点に、ある比率で外力が加わることになるが、シミュレーションで実現する際には、これを弾性モデルにおいてバネの一方の端点に加わった外力の一部がバネの内力により他方の端点に伝搬したと考えると都合がよい。すなわち完全弾性のモデル (図 3-8 (b)) のシミュレーションにおいて、振幅の発散を抑えるための仮想的な偶力をバネの内部で発生させれば、それはこの折衷モデル (図 3-8 (c)) と等価なものとなる。この仮想偶力によって生じるバネの加速度すなわち速度の変化量  $\Delta v$  は、式 (3.4) における左辺の相対速度が右辺の許容値を超えた分の半分となる。

$$\Delta v = \frac{1}{2} (|v_2 - v_1| - \theta). \quad (3.5)$$

それをバネの両端点の速度に互いに逆向きに加えることにより相対速度は許容値まで減少する。

従って、折衷モデルのシミュレーションは通常弾性モデルのシミュレーションの部分的な変更により容易に実現することができる。具体的には、式 (3.1), (3.2) で示される従来の更新手続き - 「速度の更新」と「位置の更新」- の間に新たに「速度の分散」と呼ばれる手続きを加えることにより実現される (図 3-9)。以下にその手順を示す。

- 1) バネのモデルが完全弾性であるとして加速度を計算し、各質点の仮の速度を求める。

- 2) 両端の相対速度に関して不等式 (3.4) を満たさないバネが存在すれば、そのバネの両端点の相対速度を減少させるための速度の修正を行う。
- 3) 2) の処理をすべてのバネが不等式 (3.4) を満たすまで反復して行う。
- 4) 位置の更新を通常どおり行う。

2) と 3) の処理が新たに加えられた速度の分散手続きである。これら処理は全体のバネの中の一部に対してのみ行われるので、これにより生じる処理時間の増加は十分無視できるほど小さく、リアルタイム性にほとんど影響はない。

折衷モデルの有効性を、単一のバネと直列につないだ 4 本のバネの跳ね返りのシミュレーション結果によって示す (図 3-10、図 3-11)。弾性のみのモデル (a) では跳ね返りの前後で上下の頂点やバネの入れ替わりが生じているが、折衷モデル (b) では頂点の位置関係が保たれ、入れ替わりの問題が生じていないことがわかる。

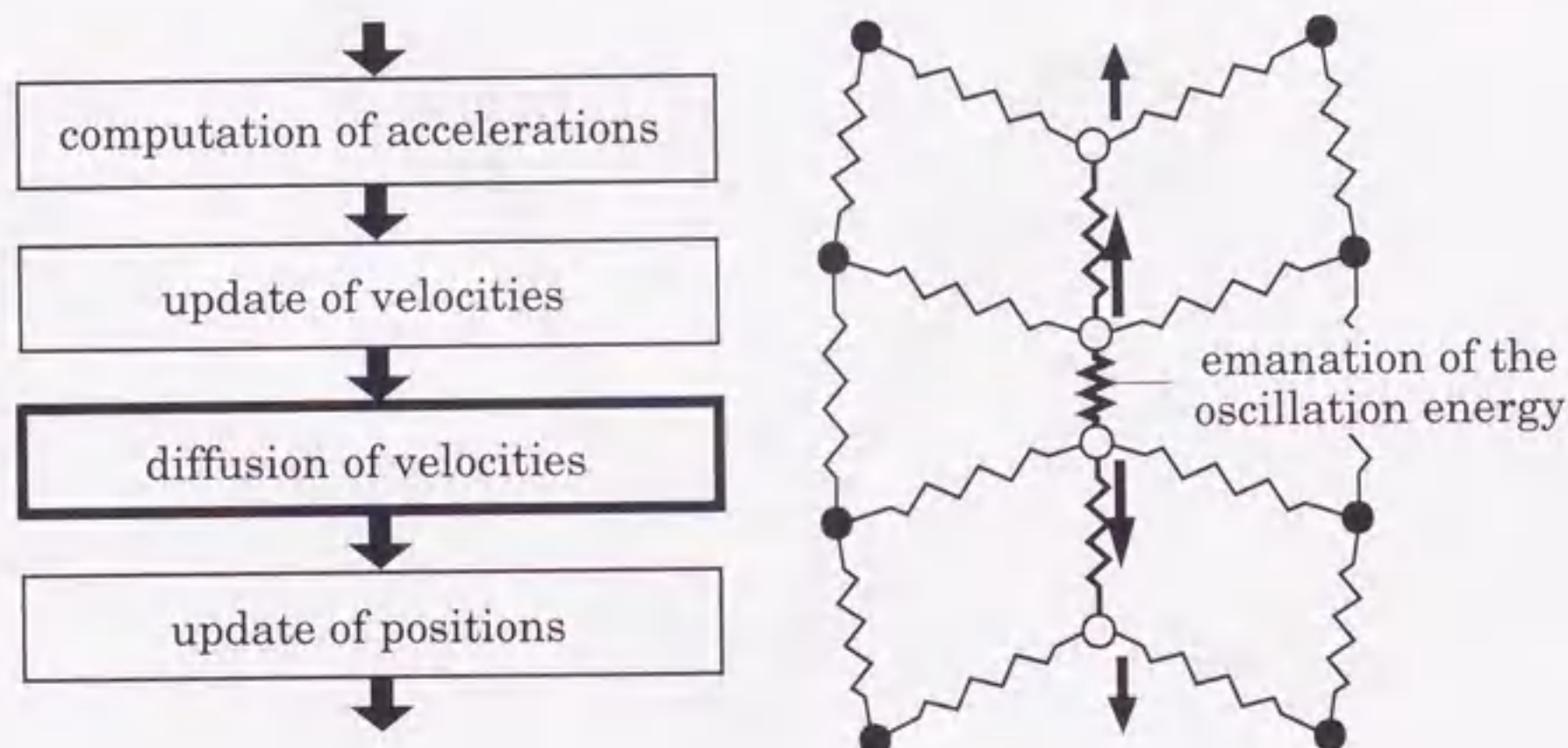
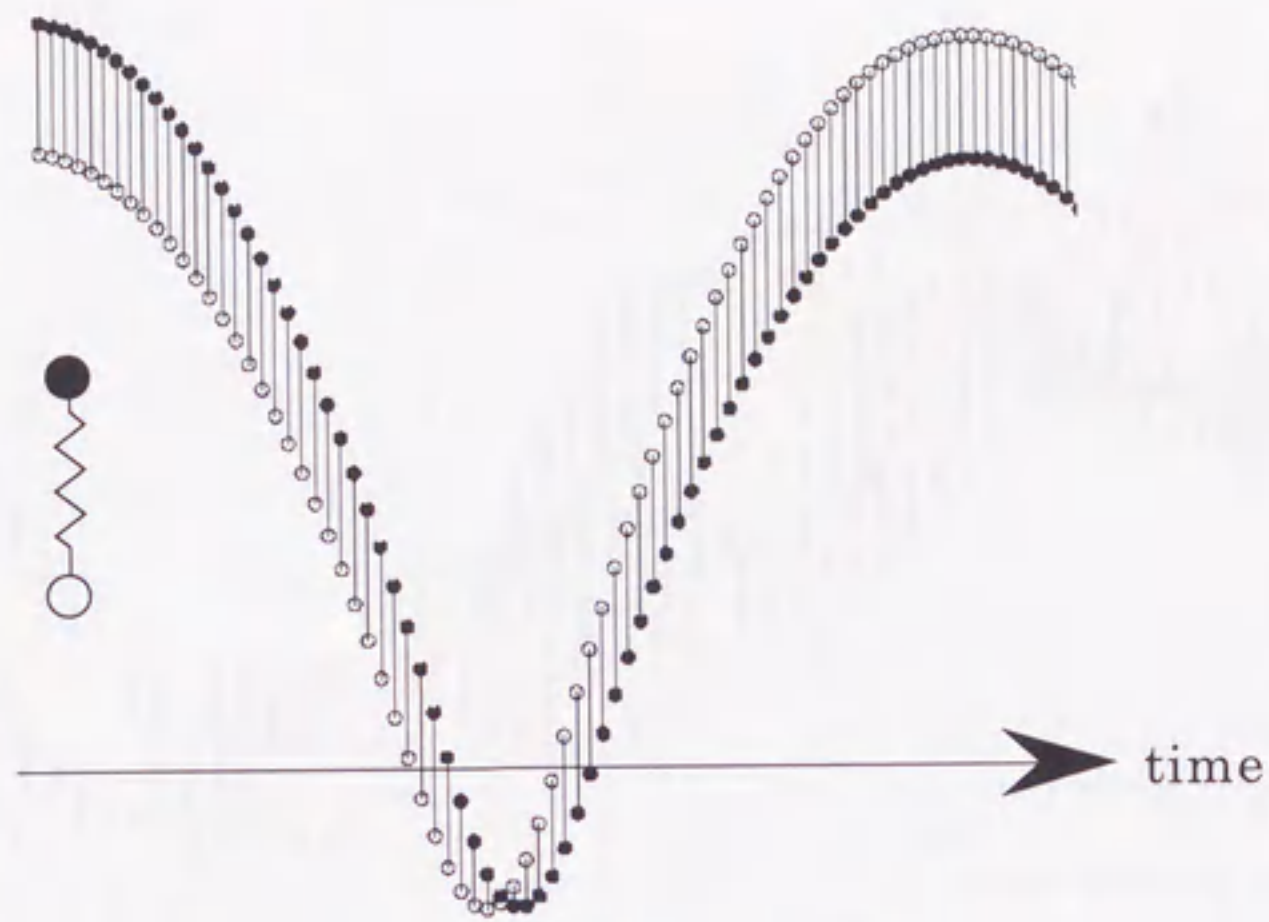
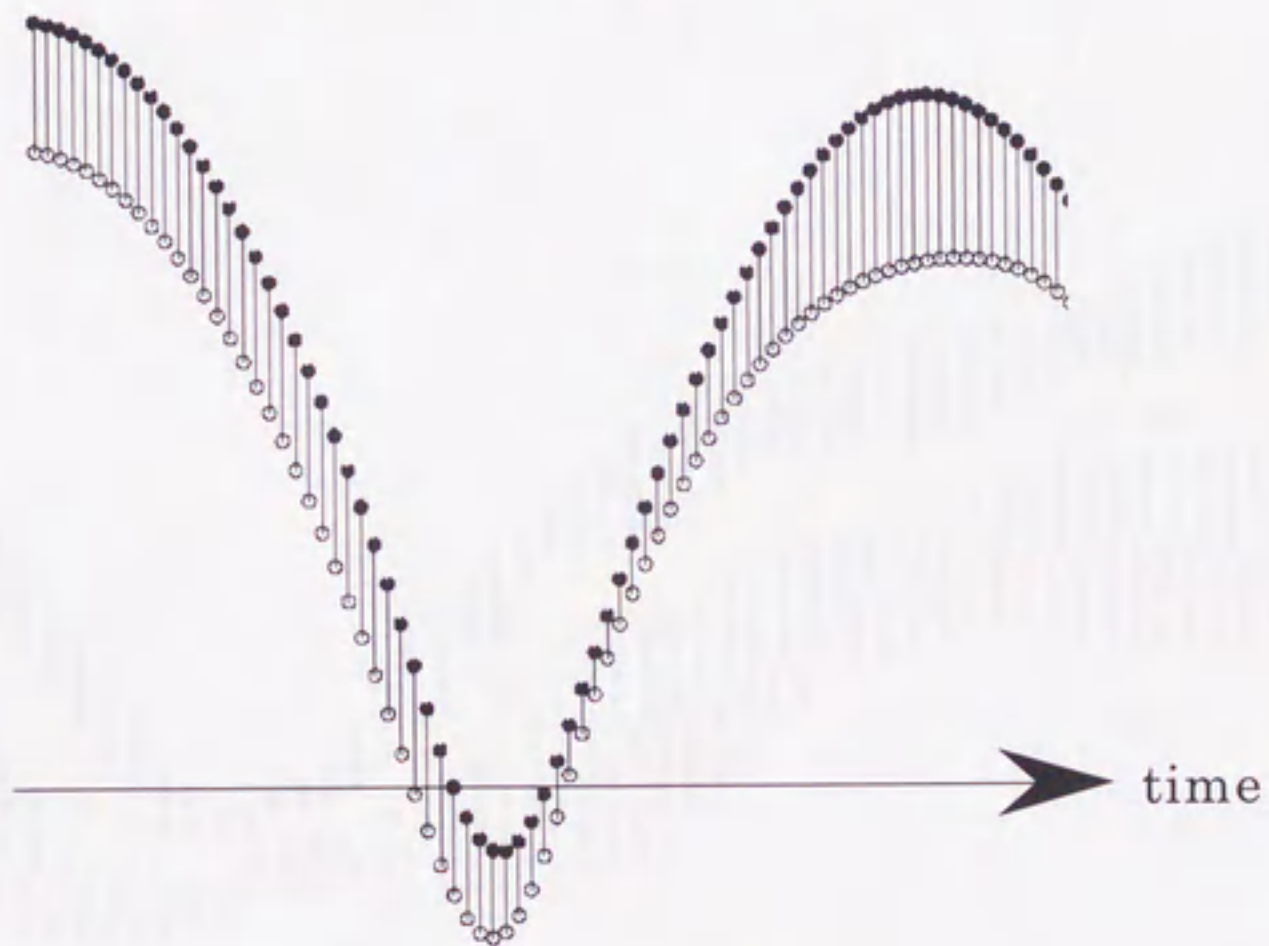


Fig.3-9 The flow of the whole processes in the evolution. In the new process, if an excess of the oscillation energy is detected in any spring, the velocities of the end points are diffused and emanation of the oscillation is restrained.

図 3-9 更新処理全体の流れ。新しい処理においては、バネの振動エネルギーの過剰が検出されると、そのバネの両端の速度が周りに拡散され振動の発散が抑止される。



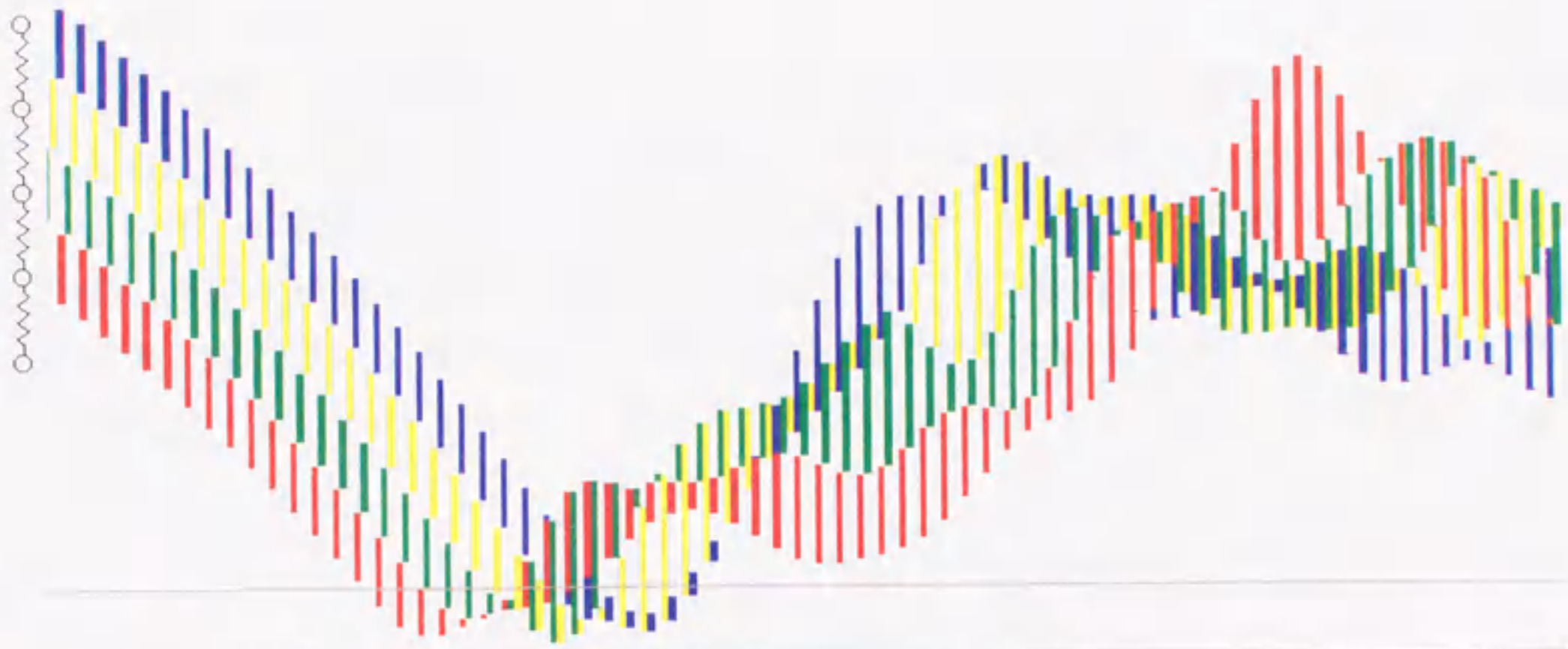
(a) completely elastic model



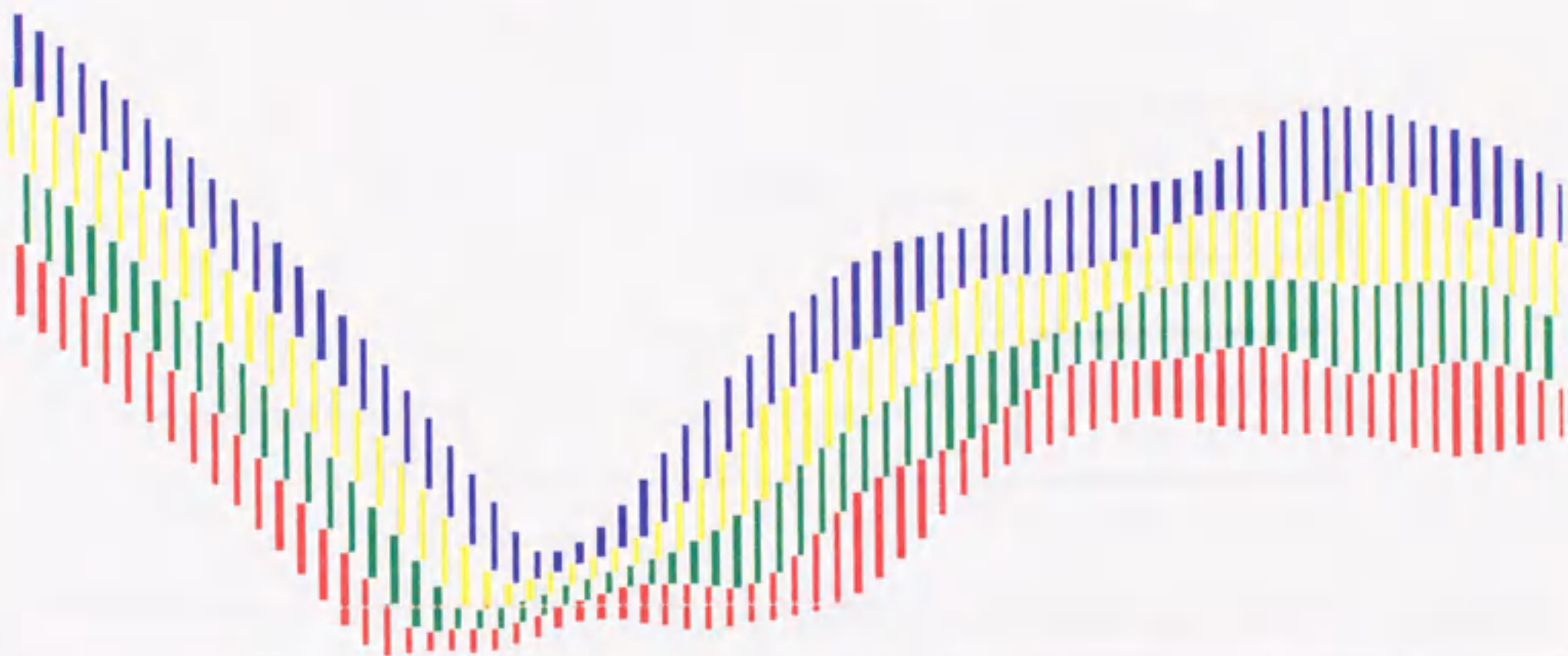
(b) compromise model

Fig.3-10 Collision processes of a single spring. The horizontal direction represents time. The vertices keep their order in (b), whereas they are reversed in (a).

図 3-10 単一バネの衝突過程。水平方向は時間の変化を示している。(b) では (a) にみられるような頂点の順序の入れ替わりは生じていない。



(a) completely elastic model



(b) compromise model

Fig.3-11 Collision processes of four linked springs. The springs keep their order in (b), whereas they are exchanged in (a).

図3-11 結合された4本のバネの衝突過程。(b)では(a)にみられるようなバネの順序の入れ替わりは生じていない。

### 3.4.5 エネルギー

剛体物体のもつ内部エネルギーが物体の重心速度による運動エネルギーのみであるのに対し、弾性モデルはこの運動エネルギーに加え振動のエネルギーをもつ。エネルギーの観点から見れば弾性モデルにおけるバネの振幅の発散は、物体に外力が働いた結果振動エネルギーがある値を越えたことを意味する。バネの振幅が自然長以下に保証される折衷モデルでは、許容範囲を超えた振動エネルギーは物体の重心を加速するための運動エネルギーに常時移行されているとみることができる(図3-12)。

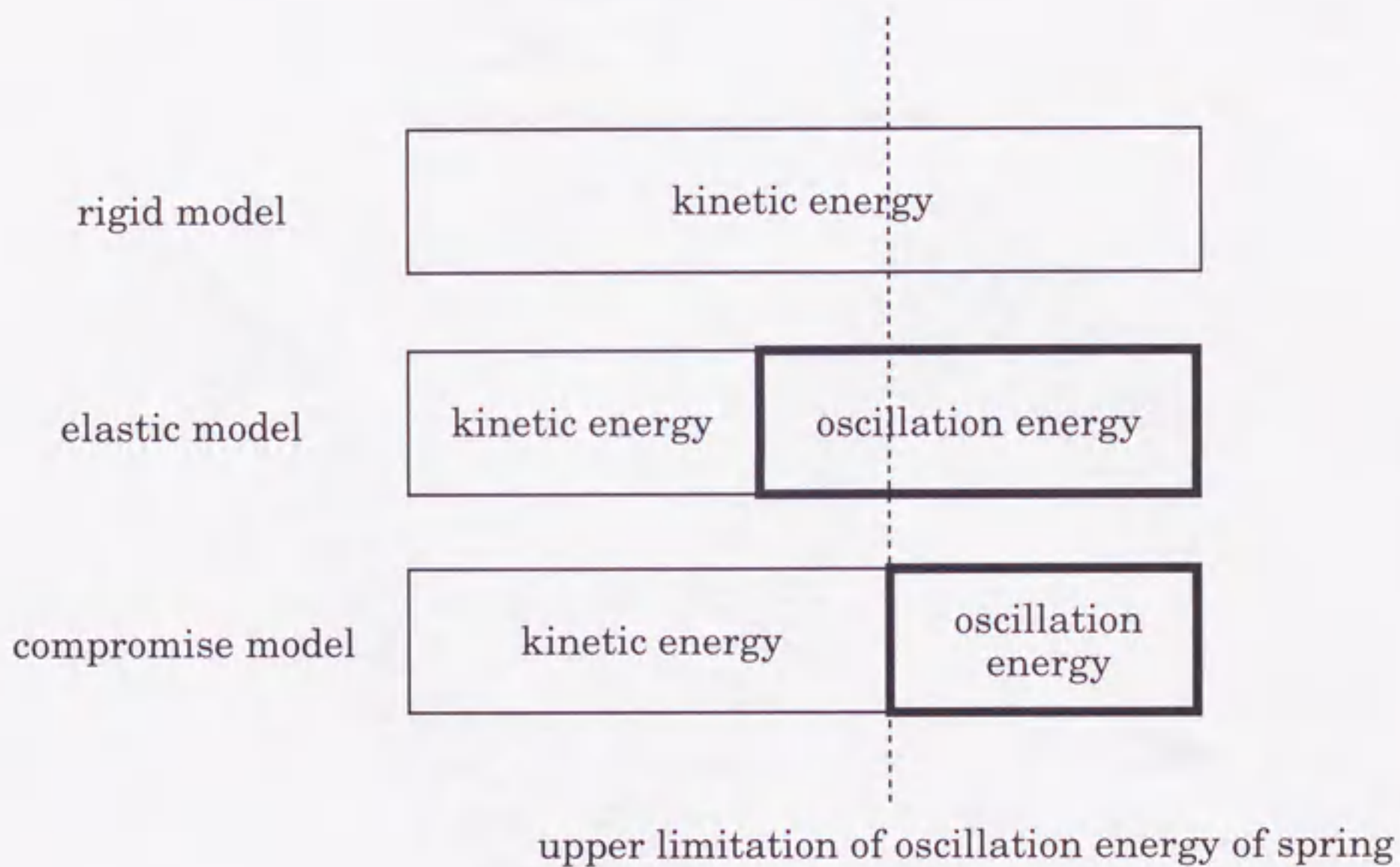
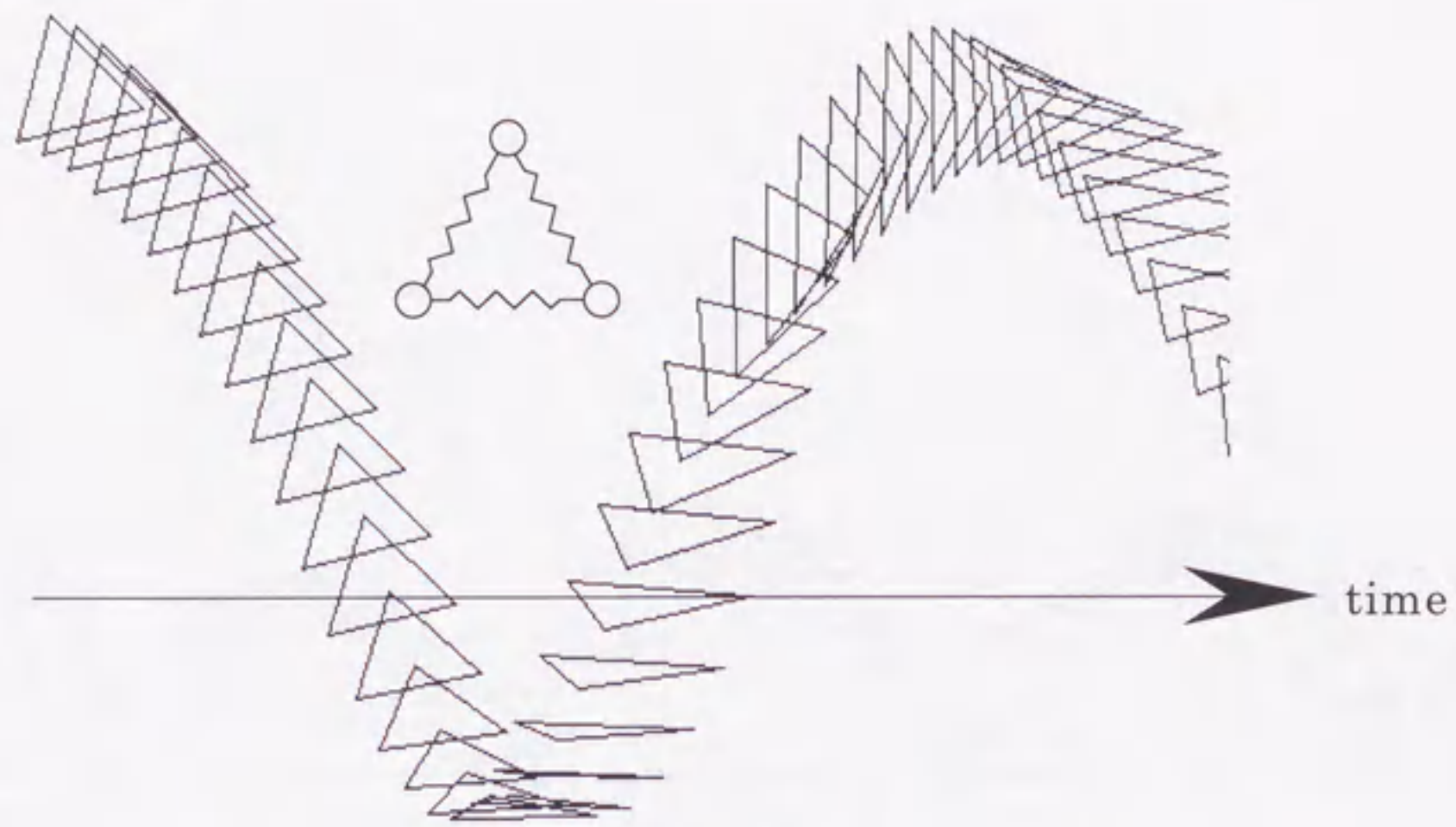


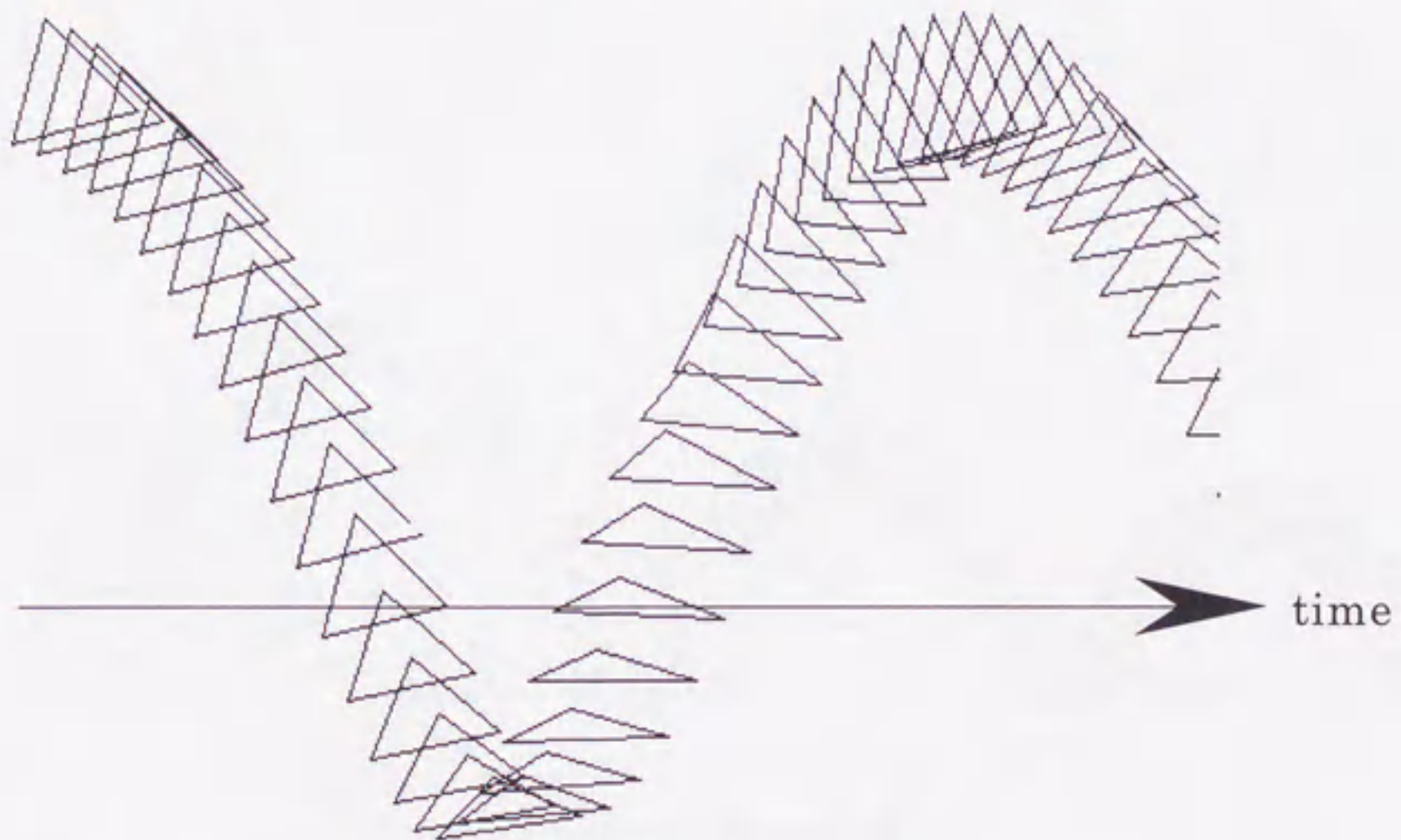
Fig.3-12 Elimination of oscillation energy in the compromise model. The higher the rigidity becomes, the more the energy of oscillation is restrained.

図 3-12 剛性と弾性の中間モデルにおける振動エネルギーの削減。剛性が増すほど、削減の度合いは大きい。





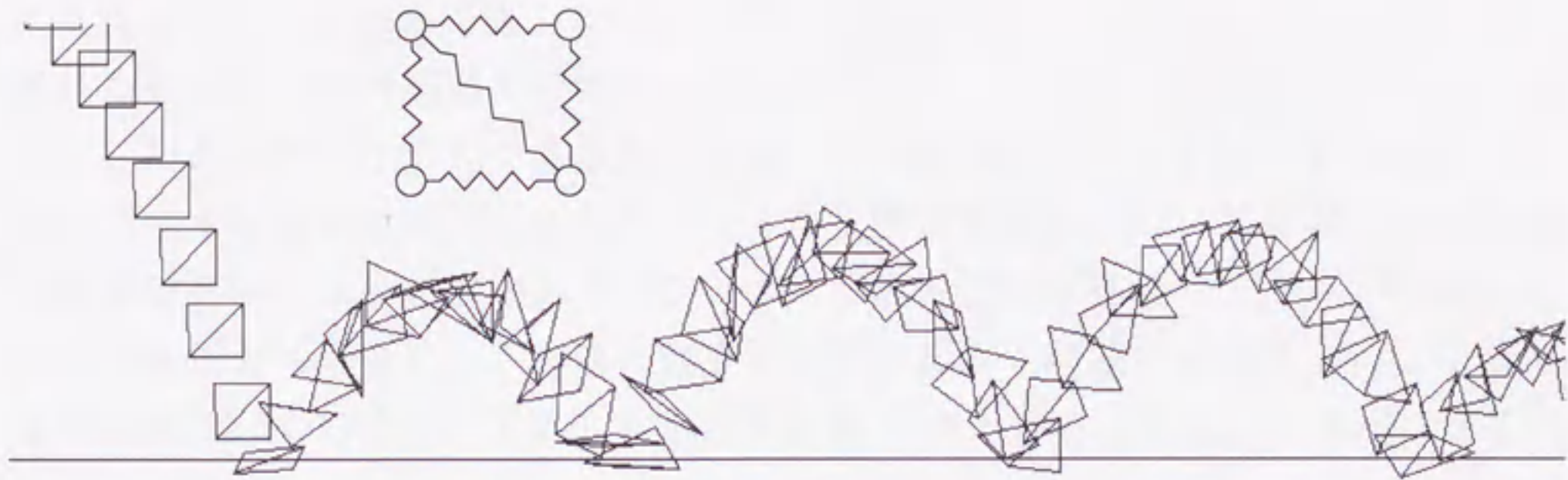
(a) completely elastic model



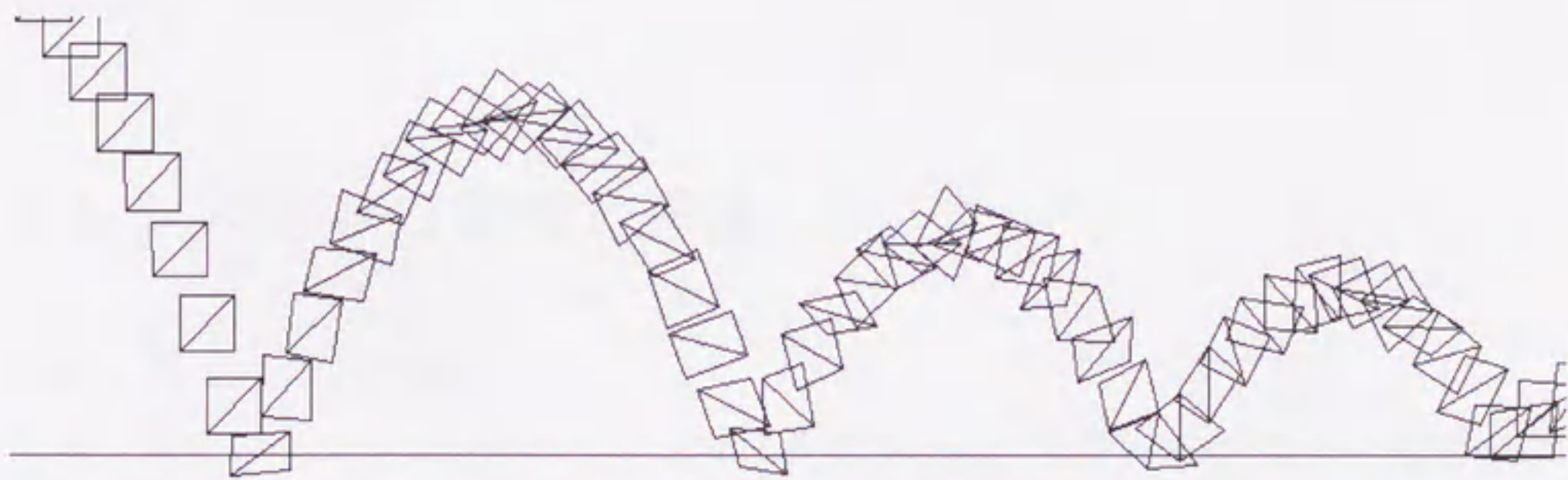
(b) compromise model

Fig.3-13 Collision processes of triangular springs. The springs keep their relative positions in (b), whereas they are reversed in (a).

図 3-13 三角形に配置されたバネの衝突過程。(b) では (a) にみられるようなバネの相対的位置の入れ替わりは生じていない。



(a) completely elastic model



(b) compromise model

Fig.3-14 Collision processes of squaral springs. The springs keep their relative positions in (b), whereas they are reversed in (a).

図 3-14 正方形に配置されたバネの衝突過程。(b) では (a) にみられるようなバネの相対的位置の入れ替わりは生じていない。

### 3.4.6 2次元および3次元物体への拡張

バネが平面的又は空間的に配置された2次元又は3次元の弾性物体では、各バネの振幅が自然長以下に保たれたとしても、物体内の質点の空間的位置関係が保たれる保証はない。例えば図3-13 (a) の三角形形状のバネモデルにおける頂点の入れ替わりは、バネの振幅の発散によるものではなく、1つの頂点がその対辺を通過したために生じたものである。このように一般的にはバネだけでなく平面や立体を構成する基本要素の三角形メッシュや正四面体セルについても質点の空間的位置関係が保たれる必要がある。ここでは折衷モデルを拡張し、バネの振幅の上限を自然長よりも更に小さな値に変更することにより問題に対処する。この変更は不等式 (3.4) の右辺に1よりも小さな係数  $\alpha$  をかけることにより実現できる。

$$|v_2 - v_1| < \alpha \theta \quad (0 < \alpha < 1). \quad (3.6)$$

これは、物体の振動を抑え剛性を高めることになるので、頂点の入れ替わりを抑制することになる。それは、頂点の入れ替わりを完全に保証するものではないが、シミュレーション結果をかなり良く改善した (図3-13 (b), 図3-14 (b))。ここでは係数  $\alpha$  の値は実験的に定めた。

## 3.5 システムの実現と評価

### 3.5.1 システムの実現

本システムはシリコングラフィックス社製 Indigo2 上で約4000行のC言語のプログラムにより実現されている。Indigo2 はテクスチャマッピング専用のグラフィックスエンジンを積んでいないが、他の点では同社製の Crimson と同様に標準クラスのグラフィックス機能をもつワークステーションである。本システムでは、弾性物体のパラメータを多様に変更し、それらの違いを比較する必要があったので、パラメータファイルを介してそれらの値の組み合わせを容易に変更できるようにした。また、物体の形状はボクセルデータにより与えられた。本システムの操作の様子を図3-15に、本システムの対話操作による仮想弾性物体の変形の様子を図3-16に示す。

### 3.5.2 実時間処理のためのパラメータ設定

動的シミュレーションにおける時刻更新の間隔  $\Delta T$  の値は、物体の運動を正確かつ実時間で生成するための様々な制約に基づいて決定されなければならない。本節では、リアルタイムシミュレーションのための  $\Delta T$  をはじめとする各パラメータの値の決定方法について述べる。

#### 1) 時刻の更新間隔 $\Delta T$

リアルタイムシミュレーションでは仮想世界の時間の進みを実世界の時刻に合わせる必要があるが、これは時刻更新の間隔  $\Delta T$  を調節することにより行われる。シ

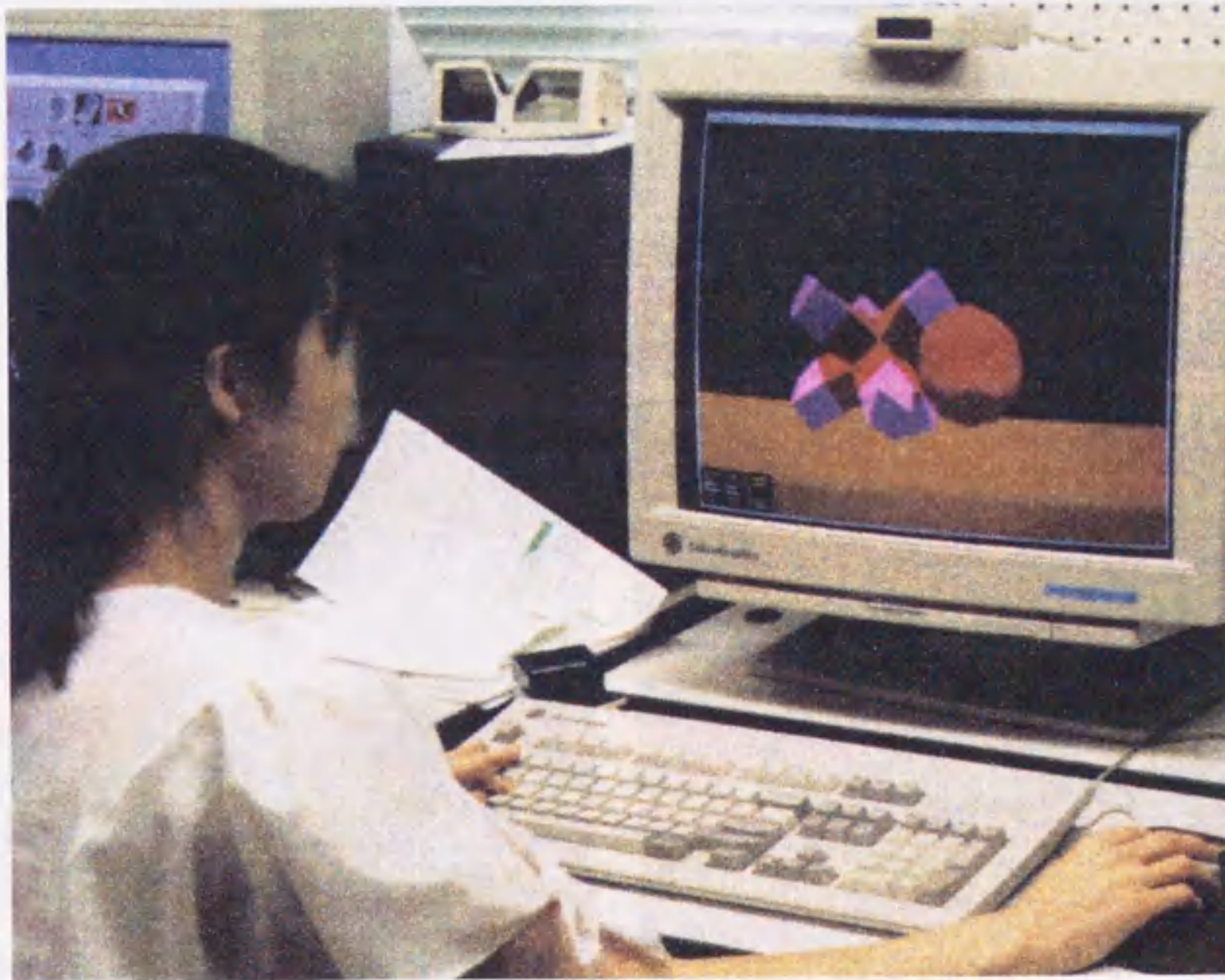


Fig.3-15 A scene of manipulation action.

図 3-15 システムの操作の様子

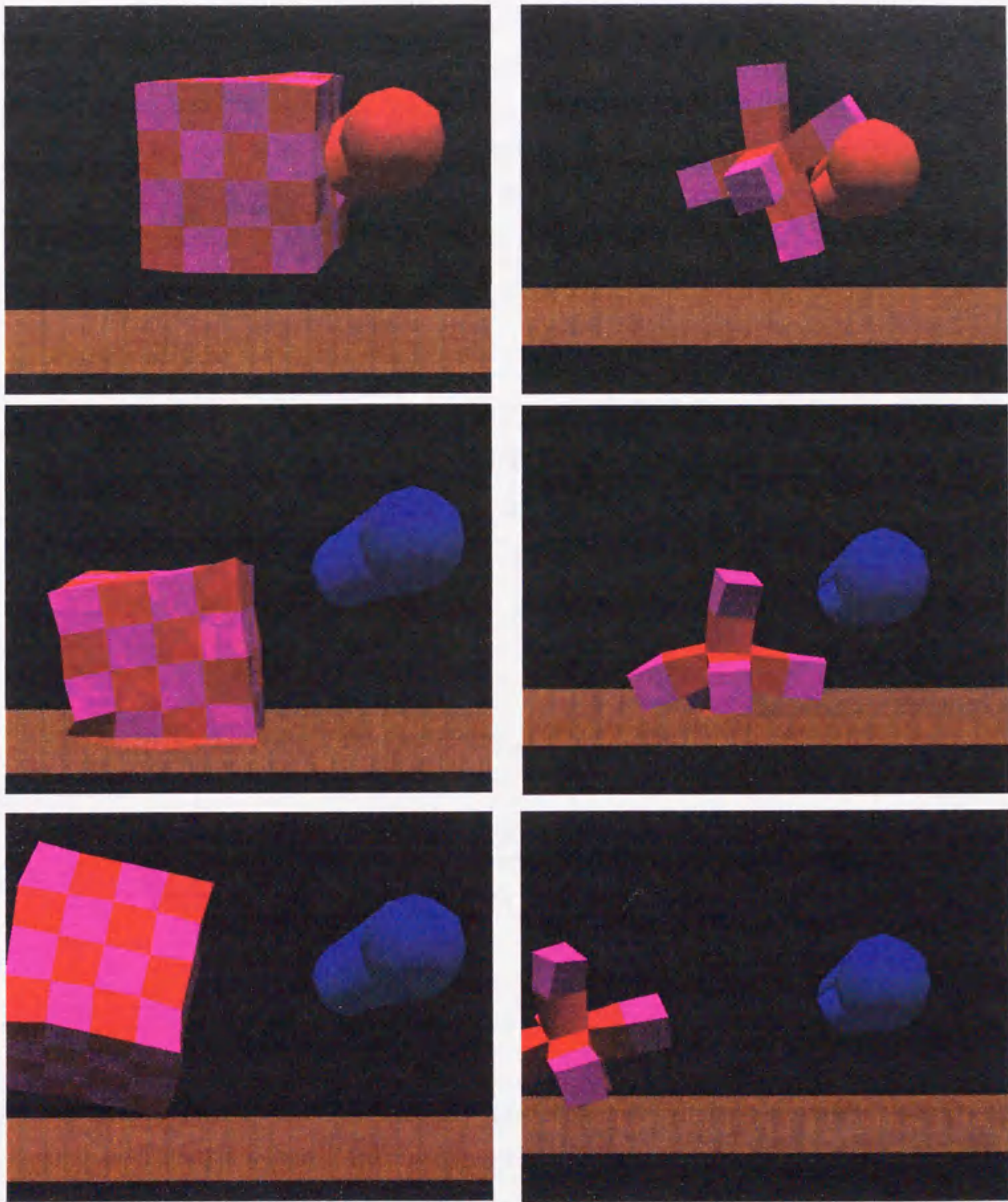


Fig.3-16 Transformation of elastic objects by interactive manipulation and rebound on the floor.

図 3-16 対話操作や床との跳ね返りによる弾性物体の変形の様子。

シミュレーションの1サイクルの行程は状態更新の計算過程とレンダリング過程からなり、1回又は数回の状態更新に対してレンダリングを1回行う必要があるが、レンダリングの終了時にはモニタのスクリーンリフレッシュに同期をとられるので、リフレッシュの1間隔（またはその整数倍）の時間内で、1サイクルのまとまったシミュレーション行程を完了しなければならない（図3-17）。これらに基づいて仮想時刻が実時刻に合うような  $\Delta T$  を以下の式により決定する。

$$n T_c + T_r < T_i, \quad (3.7)$$

$$\Delta T = T_i / n. \quad (3.8)$$

すなわち、リフレッシュ間隔  $T_i$ 、計算時間  $T_c$ 、レンダリング時間  $T_r$  より不等式(3.7) を満たす、1回のリフレッシュ間隔内で可能な状態更新の計算の反復回数  $n$  を求める。求める  $\Delta T$  の値はリフレッシュ間隔  $T_i$  を  $n$  等分したものである（式(3.8)）。シミュレーションの近似精度が高まるといふ点で  $\Delta T$  はできる限り小さい

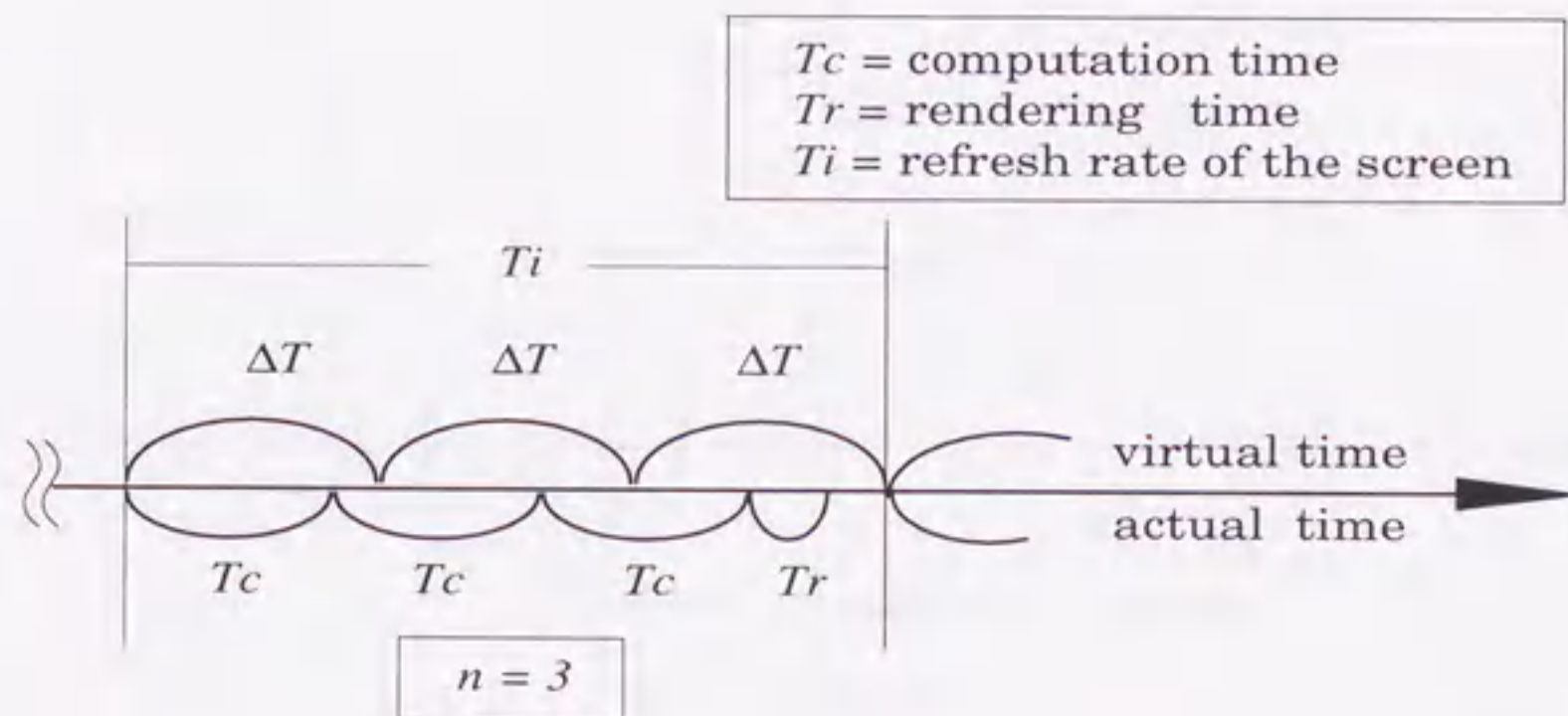


Fig.3-17 Distributions of virtual time and actual time during the refresh interval of the screen. Several times of computation processes and one rendering process are included in each term.

図3-17 スクリーンのリフレッシュ区間内の実時刻と仮想時刻の配分。1区間の中に数回の状態更新の計算過程と一回のレンダリング過程が含まれる。

方がよいので  $n$  の値は可能なもののうちで最大のものを選ぶ。

また、最近の計算機では数種類のリフレッシュレイトを選択変更できるものもあるので、スクリーンのリフレッシュレイトに対する無駄時間が少ないような相性の良いリフレッシュレイトとパラメータを選択することもシミュレーションの限界を向上させるためには重要である (図 3-18)。

## 2) バネ定数の上限

前節では、仮想時刻を実時刻に合わせるための時間間隔  $\Delta T$  の決定方法を述べた。本節では物体の運動を近似精度を極端に損なうことなく正しく表現できるための

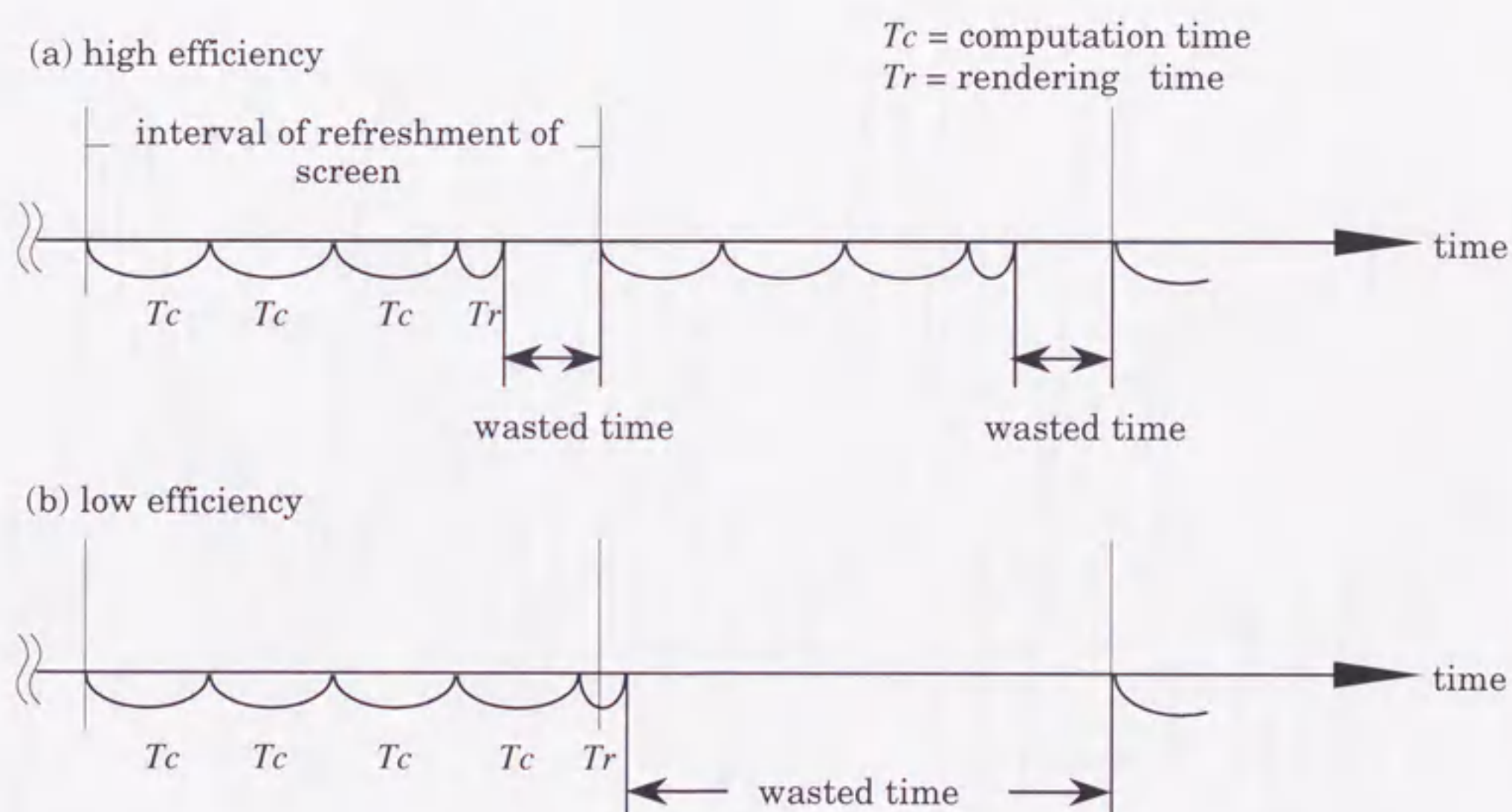


Fig.3-18 Efficient distribution of processes compared to the refresh rate of the screen. The larger the wasted time becomes, the less the interactivity is declined.

図 3-18 スクリーンのリフレッシュレイトに対する効率的な処理の配置。無駄時間の増大はリアルタイム性を低下させる。

$\Delta T$  の制約について述べる。質点-バネモデルの運動は局所的にみれば単振動であるので、 $\Delta T$  の値はこの単振動の周期に対して十分小さいものでなければならない。図3-19は単一のバネの一端を固定し振動させた場合の、もう一方の端点の位置と速度を数値シミュレーションにより近似的に求めた結果をグラフに表したものである。 $\Delta T$  の値が比較的小さい (a) の場合には解析解である正弦波の軌跡を十分よく近似しているが、 $\Delta T$  の値が増加してくると (b) のように次第に近似精度が落ち、(c) ではもはや正弦波を近似しているとは言いがたい結果となっている。このグラフが示すように  $\Delta T$  の値はバネの振動の周期  $T_s$  のせいぜい10分の1以下でなければ単振動の正しい動きを表現していない。逆に  $\Delta T$  の値が固定されれば、振動の周

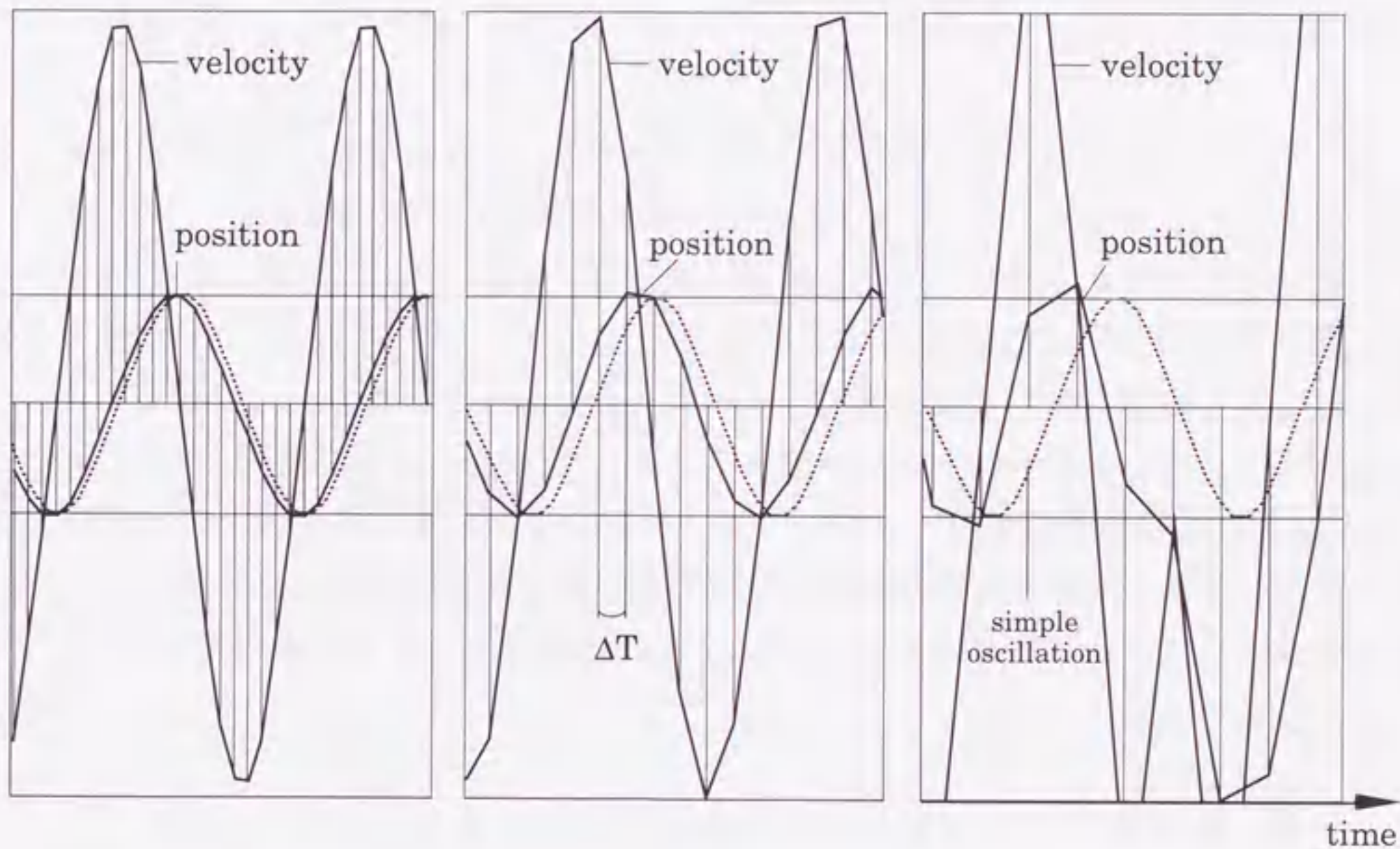


Fig.3-19 Results of numerical simulation of simple oscillation. Time interval  $\Delta T$  must be sufficiently smaller than the length of a period of the oscillation.

図3-19 単振動の数値シミュレーション結果。時刻の更新間隔  $\Delta T$  は振動の周期に対して十分小さくとる必要がある。



期と関連するバネ定数は以下に示すような  $\Delta T$  の 2 乗に反比例する上限の値をもつ。

$$\Delta T < \frac{T_s}{N} \left( T_s = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \right), \quad (3.9)$$

$$\frac{k}{m} < \left( \frac{2\pi}{N\Delta T} \right)^2, \quad (3.10)$$

質点の質量  $m$  が 1、 $\Delta T$  がバネの振動の周期  $T_s$  の 10 分の 1 ( $N = 10$ ) であるとき、バネ定数  $k$  の上限は以下のようなになる。

$$k < \frac{0.4}{\Delta T^2} \quad (m = 1, N = 10). \quad (3.11)$$

典型的な例として  $n \times n \times n$  の立方体格子によって構成される弾性物体のリアルタイムシミュレーションのためのパラメータを表 3-1 に示す。リフレッシュレートが毎秒 30 フレームで実現可能な格子数  $5 \times 5 \times 5$  までの場合についてリアルタイム性が十分保証され、動画のスムーズな動きを犠牲にすれば毎秒 11 フレームの格子数  $7 \times 7 \times 7$  まで対話性は維持される。格子数  $7 \times 7 \times 7$  では可能なバネ定数の上限が現実的でないので、実際に存在する物体の固さを考慮すればやはり  $5 \times 5 \times 5$  の場合が現在の計算機パワーの上限であるといえる。しかしながら、今後の計算機の性能向上や、バネ格子モデルの計算が局所処理に基づいており並列処理が可能であることを考えれば、本研究の成果を更に大規模な応用システムへ発展させていくことは十分に期待できる。

表 3-1 リアルタイムシミュレーションのためのパラメータ値の例

$n \times n \times n$ cubic lattice	2	3	4	5	6	7
number of nodes	27	64	125	216	343	512
number of springs	90	252	540	990	1638	2520
$n$ (update/frame)	11	5	2	1	1	1
$\Delta T$	0.003	0.006	0.015	0.03	0.048	0.08
upper limit of spring constant	43000	10000	1700	430	170	60
frame/sec	30	30	30	30	20	11

### 3.6 むすび

本章では、質点-バネモデルにより表現された弾性物体に対するリアルタイム操作が可能な弾性物体の操作シミュレーションシステムについて述べた。剛体と線形バネの中間的な性質をもつバネモデルを導入することにより、弾性物体に比較的大きな力が加わるマニピュレータとの衝突についても妥当な跳ね返り運動を実現することができた。これは今後、弾性物体に対する対話型シミュレーションの応用システムを実現していく上で有効なモデルとなりうる。

弾性物体の表面に加えられた力は実際には瞬時に物体内部へ伝搬する。数値シミュレーションでは、時刻を微少ではあるが有限の間隔 $\Delta T$ で更新するために、力の伝搬に遅れが生じる。力を分散させるという処理は、ある離散時刻に弾性物体の一部に過剰に加えられた力を次の離散時刻までの間隔内に周りに伝搬させるので、この遅れを実質的になくす効果を持っているといえる。また、振幅の発散を抑える方法として、バネの伸びに対する弾性力の関係を非線形なものに変更するということが考えられるが、この方法はバネの変位が大きいときにバネ定数を大きくすると等価であるため、バネ定数が大きくなると間隔 $\Delta T$ を小さくしなければならずリアルタイム性の低下につながる。これらのことから、本文で述べた改良されたバネモデルはリアルタイム処理を必要とする対話型システムの場合において有効であると考えられる。

3.5.2節のシミュレーション実験の結果は物体のバネ定数が比較的小さい場合についてはリアルタイムシミュレーションが有効に行えることを示している。自然界の物体のもつ弾性的性質を表現する上で問題となるのは剛体として近似できるバネ定数が大きい場合よりもむしろ小さい場合であるので、この事実は今後一般的な場合を考えていく場合に有利に働くであろうことを示唆している。今後は、バネ定数の大きな物体を剛体とみなした剛体と弾性体の混在した仮想世界との対話という形で様々な仮想の操作環境が実現されていくことであろう。

今回提案したモデルは、バネの振動発散の問題を著しく改善したが、それは1次元的なバネの発散の抑止のみを保証したものであり、2次元、3次元のセル単位において保証するものとはなっていない。しかしながら、本文で述べたような方法を組み合わせてこのモデルを更に発展させればセル単位においても発散の抑制を保証できる可能性は十分にある。

## 参考文献

- 1) Terzopoulos D, Platt J, Barr A, Fleisher K : Elastically Deformable Models, Computer Graphics, 21 (4) , pp.205-214, 1987.
- 2) Terzopoulos D, Fleischer K : Modeling Inelastic Deformation : Viscoelasticity, Plasticity, Fracture, Computer Graphics, 22 (4) , pp.269-278, 1988.
- 3) Platt J, Barr A : Constraint Methods for Flexible Models, Computer Graphics, 22 (4) , pp.279-288, 1988.
- 4) Haumann D, Parent R : The Behavioral Test-bed : Obtaining complex behavior from simple rules, The Visual Computer, 4, pp.332-347, 1988.
- 5) Witkin A, Welch W : Fast Animation and Control of Nonrigid Structures, Computer Graphics, 24 (4) , pp.243-252, 1990.
- 6) Baraff D, Witken A : Dynamic Simulation of Non-penetrating Flexible Bodies, Computer Graphics, 26 (2) , pp.303-308, 1992.
- 7) Metaxas D, Terzopoulos D : Dynamic Deformation of Solid Primitives with Constraints, Computer Graphics, 26 (2) , pp.309-312, 1992.
- 8) Norton A, Turk G, Bacon B, Gerth J, Sweeney P : Animation of Fracture by Physical Modeling, The Visual Computer, 7, pp.210-219, 1991.
- 9) Carignan M, Yang Y, Thalmann N, Thalmann D : Dressing Animated Synthetic Actors with Complex Deformable Clothes, Computer Graphics, 26 (2) , pp.99-104, 1992.
- 10) Breen D, House D, Getto P : A Physically-based Particle Model of Woven Cloth, The Visual Computer, 8, pp.264-277, 1992.
- 11) 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, 信学技報, PRU93-154, pp.89-96, 1994.

## 第四章 むすび

### 4.1 研究成果の要約

本文では、仮想物体として多重に折り重なる紙と、小規模ではあるがボクセル形状の弾性物体を取り上げ、それらに対する仮想空間操作を標準のワークステーション環境で実現した。折り紙シミュレーションシステムでは、紙の幾何学的構造を表現するためのモデルを考案し、マウス入力を用いて、モデルの状態を変更できる機構を実現した。弾性物体の操作システムでは、リアルタイム処理が困難とされる物理法則に基づいたモデルを対象とした操作を、限定された範囲ではあるが実現した。これらは、ある目的の上でモデル化された仮想世界に対してリアルタイムの対話操作の実現を現在の計算機環境において試みた数少ない実例であり、今後、仮想現実感システム等を開発していく上で重要な要素を含んでいる。

仮想現実感あるいは人工現実感というキーワードが我々コンピュータサイエンティストの脳裏に衝撃的な印象を与えてから久しく時が経つ。にもかかわらずこの新しい技術が実質的な意味で実現されていない理由は、言うまでもなく、この技術の達成の困難さにある。それは、複数の専門分野にわたる、かけ離れた分野の技術を統合することの難しさである。さらに、人体の位置計測のためのセンサーの開発、立体視技術、仮想世界のソフトウェア開発などはすべて、それ自体が独立した大きな研究テーマであり、それぞれに異なる分野の知識や技術が必要となる。故に、本研究は仮想現実システムの部分的な開発でしかないわけであるが、少なくとも仮想現実感実現の一つの大きな部分を担っていることは間違いない。本研究における紙の複雑な幾何学構造や力学に基づく弾性物体のモデルに対する仮想空間操作技術の蓄積は、今後のVRの研究開発に必ずや寄与するものと確信する。

実世界で起こる様々な現象を計算機上でシミュレーションできるということはその物体の計算機表現を得ることを意味するが、これはCGのモデリング技術に他ならない。ある種の具体的な物体を対象として取り上げた場合、その物体のもつ様々な性質のうち我々はその物体についてイメージする部分の性質は少なくともモデル

化される必要がある。例えば、物体を理想的な剛体として扱ってよい場合に、弾性等のより計算コストのかかる性質をあえてモデル化する必要はない。計算機の処理速度がそれほど速くない時代では、モデルの生成は物体の物理的性質を正確に反映したものではなく、むしろ物体の形態や幾何学的性質をうまく記述することにより行われていた。例えば、物体の運動を本来支配している物理的背景を無視して、その表面的な挙動のみに基づいて運動の軌跡を単純な数式による関数等の形で与えるなどの方法が主流であった。あるいは、むしろそのような物体が対象として選ばれていたと言ってもよい。しかし物体運動をより正確に模倣するためには、物体のもつ物理的な性質に基づいてモデルを生成することが必要となってくる。とはいえ幾何学的モデリングの手法は今後も用いられていくであろう。こうした意味で本研究で対象とした折り紙と弾性物体は幾何学的要素の強いモデルと物理的要素の強いモデルという現在のCGにおける2つの典型的なモデリング手法を取り上げて検討したことになる。計算機の性能がめまぐるしく進歩していく現代においては、当面は、自然現象や生物等のもつ複雑なメカニズムを幾何学的要素と物理的要素の両方を備えたモデルを用いて表現することを試みながら、それらを対象としたより実用的な対話システムを計算機の進歩の度合いを見据えながら実現していくという研究のスタイルをとることになるであろう。

## 4.2 今後の課題

今回実現した2つの対話システムの対象とされた、折り紙と弾性物体のモデルについては、各章の最後に述べたようにまだ改良すべき点は数多く残されている。VR技術の水準の向上には仮想世界を構築するためのソフトウェア技術の進歩は不可欠であり、より一般的な性質をもつ紙のモデルや弾性を有する物体を対象とした具体的な操作環境を実現していくことは研究対象として興味深い部分である。

従って、仮想物体のモデルが更に複雑になってくることが予想されるわけであるが、それに伴い今後はそれらのモデルをリアルタイムで処理し、かつ対話性を損なわないための工夫が必要となってくる。ただ単に計算機性能の向上を期待するだけでなく、例えば、並列処理が可能な計算機上で実現することも考えていかなければならないであろう。仮想世界が必要とする処理を複数のマシンに分散し、ネット

ワークを介してシステムを実現することも必要となろう。このような並列分散処理を実現するためには、新たにそれらの間のスケジューリングや同期タイミングの技術が必要となる。ネットワークの通信パフォーマンスの向上や、同期処理等において発生する無駄時間の削減等の新たな問題が表面化してくる。これらの問題に対する解決は、更に次に述べるような新しい技術の可能性を示唆している。ネットワーク技術を利用することにより、遠隔地にいる複数人間がネットワークを通じて同一の仮想空間を共有し様々な操作を行うことができる環境が要求される。現に身体障害者や入院患者を対象としたネットワークコミュニケーション等の有用な試みも既に始まっている。仮想空間の共有が、仮想空間操作技術の応用の可能性を飛躍的に高めることは間違いないであろう。

一方、ハードウェア技術に関していえば、入出力デバイスを考えていかない限り人間の自然な動作での完全な仮想現実システムの実現はあり得ないことを考えると、ソフトウェアにより構築された仮想世界をVRデバイスと結合する技術の向上が必要不可欠である。VRがデバイスに深く依存する技術であるにも関わらず、その分野における研究が立ち後れている最大の理由は、この技術がハードウェアとソフトウェアの両方を融合して初めて完全となる性質のものであるからであろう。これは逆にとれば、現状のVRデバイスの性能の不足をソフトウェアにより改善することも考えられるということである。データグローブ等の入力デバイスの精度の低さを、ソフトウェアにより補正できる可能性はまだ十分にある。また、立体視等の3次元形状の認識の問題に関しても、ソフトウェア側で可能な限りリアリティを向上させることを検討していかなければならない。

VRのような複数の分野にわたる新しい技術の開発を考えると、今後は独自で研究していくのではなく複数の異なる分野の研究施設が密接なつながりをもって共同で研究していくのが自然な形なのかもしれない。

## 謝辞

最初に、本研究を進めるにあたって絶えず御指導、御鞭撻を賜り、研究の厳しさを御教示して下さった大学時代からの恩師である名古屋大学工学部鳥脇純一郎教授に深く感謝する。同学部大西昇教授には貴重なお時間を本論文のために割いて頂き、深く感謝する次第である。また、本研究テーマとその指針を与えて頂き、常に最良の道を御教示して頂いた同学情報文化学部横井茂樹教授に心から感謝する。同学部安田孝美助教授には、執筆やプレゼンテーションの細かなテクニックを御教示頂いただけでなく、日常の研究生活の中においても数多くの貴重なアドバイスを頂いたことを心から感謝すると共に今後のご活躍をお祈りする。

筆者の所属する中京大学情報科学部の福村晃夫教授には、赴任当初から多大なる御援助を賜り、身に余る思いであり深く感謝する次第である。同学部、長谷川純一教授には、公私ともにおける様々な場面で、常に心温まるお心遣いを頂いたことを心から感謝する。また、研究室を共にして2年半余りになる村上和人助手には、筆者が教育活動を行う上で多大な援助を頂いた。本研究を円滑に進められたのも恩師の御厚意があったからに違いない。

私の修士時代に、研究のやり方を一からご教示頂き、私の博士課程への進学のかっかけを与えて下さった、茨城大学工学部米倉達広助教授に深く感謝すると共に今後のご活躍をお祈りする。現在の私があるのは、恩師との出会いがあったからに他ならない。

最後に、日頃熱心に御討論いただいた鳥脇研究室の歴代の方々に深く感謝の意を表す。特に日頃共に行動し、事ある毎に助けていただいた齊藤豊文講師、清水昭伸助手、北川英志氏、東海章吾氏、目加田慶人氏、森健策氏には紙面では表しきれない感謝の意を示すと共に彼らの今後のご活躍を心からお祈りする。彼らと常に昼夜を問わず共に過ごした大学院時代は、筆者にとって一生忘れることのできない大切な思い出である。





inches 1 2 3 4 5 6 7 8  
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

# Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak



# Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

**A** 1 2 3 4 5 6 **M** 8 9 10 11 12 13 14 15 **B** 17 18 19

