

弾性物理シミュレーションのアミューズメント応用

— ふわふわ物体玉入れ —

遠藤守[†] 宮崎慎也[†] 山田雅之[†] 長谷川純一[†] 安田孝美^{††}

横井茂樹^{††}

[†] 中京大学 情報科学部 〒470-0393 豊田市貝津町床立 101

^{††} 名古屋大学大学院 情報科学研究科 〒464-8601 名古屋市千種区不老町 1

E-mail: †{endoh,miyazaki,myamada,hasegawa}@sccs.chukyo-u.ac.jp, ††{yasuda,yokoi}@is.nagoya-u.ac.jp

あらまし 物理シミュレーションによる自発的な動作生成はコントロールが難しく、CGゲームをはじめとするアミューズメントの分野では、コントロールが容易なルールベースの動作生成の方法が好んで用いられている。しかしながら、物理シミュレーションの予測困難な動作はうまく利用すれば新しいゲーム性を見出せる可能性を秘めている。そこで本研究では、物理シミュレーションのアミューズメント分野への応用として、柔らかい弾性と崩壊の性質を有する仮想物体（ふわふわ物体）をフォースフィードバック付ジョイスティックでうまく力を加えながら玉入れ操作ができる対話システムを作成した。「街の中メディア祭」と呼ばれるイベントに出展し一般の人に操作を体験してもらったので、その結果についても報告する。

キーワード コンピュータグラフィックス, 物理シミュレーション, 仮想弾性物体

An Application of Elastic Physics Simulation in Amusement Fields

A "basketball game" with soft objects

Mamoru ENDO[†], Shinya MIYAZAKI[†], Masashi YAMADA[†], Junichi HASEGAWA[†], Takami

YASUDA^{††}, and Shigeki YOKOI^{††}

[†] School of Computer and Cognitive Sciences, Chukyo University Tokodachi 101, Kaidu-cho, Toyota, 470-0393 Japan

^{††} Graduate School of Information Sciences, Nagoya University Furo-cho 1, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601 Japan

E-mail: †{endoh,miyazaki,myamada,hasegawa}@sccs.chukyo-u.ac.jp, ††{yasuda,yokoi}@is.nagoya-u.ac.jp

Abstract Active movement generation through physics simulation is less favored than the method of rule-based movement generation in the amusement field such as for CG games due to its harder movement control. However, the effective use of non-predictable movements of physics simulation has great possibilities in developing new game styles. In our research applying physics simulation in the amusement field, we constructed an interactive system for controlling a soft object with the features of being elastic and collapsing to be thrown into a basket by applying a joystick device with force feedback function. We also present results of people having used and experienced our system, which we exhibited during an event on 'the use of media in the city'.

Key words computer graphics, physics simulation, elastic model

1. まえがき

アミューズメント分野における VR 技術の発展は目覚しく、家庭用ゲーム機などでもフォースフィードバック機能を備えた操作デバイスが普及してきている。物理法則に基づいた弾性物体の構築手法は、物体の局所的性質を比較的単純な力学モデルを用いて記述するのみで、変形物体の自然な動きを容易に生成できるとしてその有効性が知られている [1]。さらに近年のコンピュータの低価格・高性能化により、一般の PC でもかなり大規模なサイズのモデルを実時間処理アプリケーション用途として利用できる可能性が高まってきた。とはいえ、実時間での運動生成のための計算量は局所力学モデルである弾性要素の数に比例するため、例えば局所力学モデルの性質を単純な線形弾性のみに限定したとしても、モデルの分解能を上げれば、要素の総数は飛躍的に増大してしまう。したがって、実時間処理用途を考えた場合、弾性要素の総数を如何に削減するかは重要な課題である。

我々はこれまで弾性要素数削減の一方法として、物体の表面から中心に向かって弾性体要素のサイズを段階的に増大させ物体内部での要素配置を削減することにより、弾性物体の運動計算を大幅に高速化できる可変解像度モデル (gradational element resolution model) を提案してきた [2]。また、任意のボクセルデータ形状に対する要素の自動配置を実現した。

医療分野をはじめとする実用的アプリケーションにおいては、弾性物体モデルは弾性変形のみでなく、切断等の操作に応じて形状が分解可能なものでなければならない。可変解像度モデルでは、外力が直接作用するため変形が比較的大きく、かつ可視部分である物体表面には最小サイズの要素を配置するが、モデル形状の分解が生じると新たな表面が生成されるため、それに応じて要素の配置を動的に再構築する必要があった。

一方、CGゲームをはじめとするアミューズメントの分野では、物理シミュレーションによる自発的な動作生成や要素配置の動的再構築を行う処理は積極的には用いられず、コントロールが容易なルールベースの手法が好んで用いられてきた。しかしながら、物理シミュレーションの予測困難な動作や切断操作が可能な仮想物体は、うまく利用すれば新しいゲーム性を見出せる可能性を秘めている。

そこで本研究では、物理シミュレーションのアミューズメント分野への応用として、柔らかい弾性と崩壊の性質を有する仮想物体 (ふわふわ物体) をジョイスティックデバイスを用いて玉入れ操作ができる対話システムの作成を行う。弾性と崩壊の性質を有する仮想物体の構築には可変解像度モデルを用い、モデル形状の分解に応じた要素の動的再配置機能を実現する。仮想物体の操作には市販で購入可能なフォースフィードバック付ジョイスティックを用いる。さらに構築したシステムを実際にイベントに出展し、一般の参加者に利用してもらうことで弾性物理シミュレーションのアミューズメント分野における応用可能性を探ることを目的とする。

本稿では、まず 2 章にて本研究に関わる関連研究を示し、3 章にて「ふわふわ物体」として実装する仮想物体について説明

する。4 章ではこの仮想物体の PC 上での実装について説明し、併せて実際にイベントを通して一般客に利用してもらった結果について考察を行う。最後に、5 章にてまとめる。

2. 関連研究

弾性要素の変形に応じた再構築に関する研究については、有限要素法における変形が大きい部分の要素を小さい要素に分解する方法 [3] を質点ばねモデルに応用した研究が報告されている [4]。このモデルは大変形部分のみ要素解像度を高められるため処理効率の良いモデルとして評価できるが、変形が大きくなるにつれて処理速度が低下するため、対話操作を伴うようなリアルタイム処理用途を考えると不利である。

また、切断可能な物体モデルを実現する方法として、質点ばねモデルのばねを切断する方法 [5] や、弾性要素間の共有点を解放する方法 [6] が報告されているが、これらは要素自体の再構築は伴わないモデルである。要素の再構築を伴うものとしては、ポリゴン形状モデルの切断に応じたポリゴン面の分割 [7] や、切断に伴う四面体弾性要素の分割 [8]、頂点の再配置 [9] が報告されている。これらの先行研究に対して、我々のモデルでは、切断面に応じた要素形状の変更は行わず、最小要素サイズの解像度を保障するものである。

3. 弾性と崩壊の性質を有する仮想物体の構築

本章では今回、「ふわふわ物体」として実現した切断可能な弾性物体モデルの概要について説明する。

3.1 可変解像度モデル

弾性要素のモデルとしては、質点ばねモデルや有限要素法の一次要素モデル [10] が広く用いられているが、大変形時での不適当な弾性力 (質点ばねモデル) や、頂点数の多い要素形状を最小要素に分解する手間 (一次要素モデル) などの問題もある。

我々の研究グループでは、大変形時にも適正な弾性力が得られ、要素の形状が自由な多面体形状を取りうる弾性要素モデルとして、剛体回転成分を除去した平衡形状からの各頂点の変位を弾性力の目安とする局所形状保持モデルを提案している [2]。本モデルは、弾性力の定義が質点-ばねモデルと同様の変位に比例するという単純なものでありながら、有限要素法と類似のものとなっている点が特徴である。また、実験的にはあるが、モデルの安定性も確認できており、質点-ばねモデルにおける、質点の位置が互いに入れ替わったまま元に戻らなくなるという問題も生じない。本モデルの概要を以下に示す。

ある瞬間の多面体である弾性要素の頂点 i の、平衡形状での重心に対する相対ベクトルを R_i 、変形形状でのそれを r_i とすれば、その変位ベクトルは $(r_i - R_i)$ で与えられるので、 r_i を既知、 R_i を未知とする力のモーメントの釣り合いの方程式

$$\sum_i r_i \times k(R_i - r_i) = k \sum_i r_i \times R_i = \vec{0} \quad (1)$$

を解くことにより、多面体の平衡形状位置および頂点に働く弾性力が一意に定まる。ここで k は変位に対する弾性力の比例定数である。ただし、 R_i は回転行列 M を用いて MR_{0i} で与え

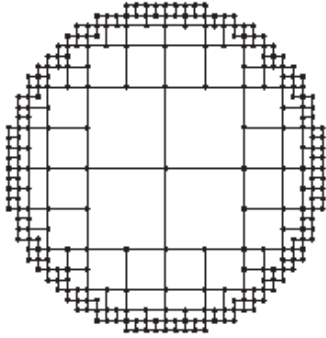


図1 円形形状の可変解像度モデル

Fig. 1 Round-shaped gradational element resolution model

られるので、実際には M を求めることになる。

弾性の強さの調節は、ばね定数と同様に変位量に対する弾性力の比例定数 k を調節することにより行うが、変位量を要素のサイズで除算して正規化し、いわゆるひずみに相当する量を変位量として用いる。要素形状が正多面体の場合には本モデルによる弾性力はヤング率に基づく FEM モデルと等価なものとなる。

図1は2次元のモデルの形状が円形の場合の可変解像度モデルを示している。実線が弾性要素の境界、点が弾性要素間の共有頂点の配置を示している。弾性要素を物体の表面から中心に向けて徐々に大きくなるように配置するために、各要素の表面側に中心側よりも多くの頂点を配置している。我々の提案する要素モデルは自由な多面体形状をとることが可能であるので、このような頂点の配置にも容易に対応できる。

運動計算の高速化のおおまかな効果であるが、 $n \times n \times n$ の3次元ボクセルの頂点数は、共有頂点を各要素で独立に数えれば $8n^3$ であり、これが可変解像度モデルでは、おおよそ $26n^2$ に削減され、 $3/n$ 倍程度の圧縮率となっている。 n が大きくなれば、圧縮の効果が期待できる。

3.2 モデルの再構築

本章では、可変解像度モデルにおける、切断に伴うモデル形状の分解に応じた弾性要素の動的再構築の処理手順を2次元の場合について述べる。

再構築処理を容易にするために、図2に示すような、要素をサイズごとに参照できるルックアップテーブル (LUT) を設定する。この LUT を参照することにより、2次元格子上の位置関係から、レベルの異なる要素間の隣接関係や頂点共有の有無を判別することができる。

可変解像度モデルでは、値1すなわち物体内部を示す各ボクセルをいずれかのサイズの要素が占める、すなわち異なるサイズの複数の要素が同一のボクセルを占めることはないという条件が常に成り立つ。再構築処理のプログラムにおいても、LUT を用いて上記の条件を維持することにより、致命的なバグによるエラーの発生を回避できる。

切断操作により、物体表面における弾性要素間の頂点共有が解放され、その結果要素間に亀裂が生じる。亀裂が物体内部に進行するに従い、より内部に位置するレベルの大きい要素をよ

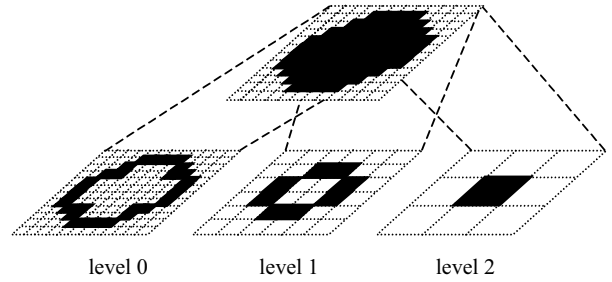


図2 多重型のサイズ別要素 LUT

Fig. 2 Multi-level LUT of quarter element of different sizes

り小さい要素に順次変更していく必要がある。この処理は、レベル0以外のすべての要素に対して、レベルの小さい順に以下に示す再構築の処理を行うことにより実現できる (図3)。

[フェーズ1]

- a) 親要素内の中点頂点 (角以外の頂点) の生成
- b) 子要素 (クォータ要素) の生成

[フェーズ2]

- c) 親要素内の不要な中点頂点の削除
- d) 親要素の再構築

ただし、サイズの小さいものから順にすべての要素に対してフェーズ1の処理を適用した後、同様にすべての要素に対してフェーズ2の処理を適用する。すなわち、すべての要素を2回走査する。

フェーズ1では、まず、各要素が次節に示す条件を満たす場合について、そのクォータ要素を生成する。親要素が辺の中点や面の中心に位置する中点頂点を持っていない場合に、それらの中点頂点を新たに生成する必要がある。中点頂点の生成が必要であるかを確定するためには近傍の要素のレベルや頂点の共有関係を調べる必要がある。しかしながら、要素は逐次的に処理されていくため、ある要素の処理を行う際に、近傍の要素に既処理のものと未処理のものが混在することになり、これをプログラムで実現するにはかなり複雑な分岐処理が必要となる。そこでここではプログラムの平易さを考慮し、フェーズ1の前半で前もって親要素の中点頂点を内分によりすべて求めておき、

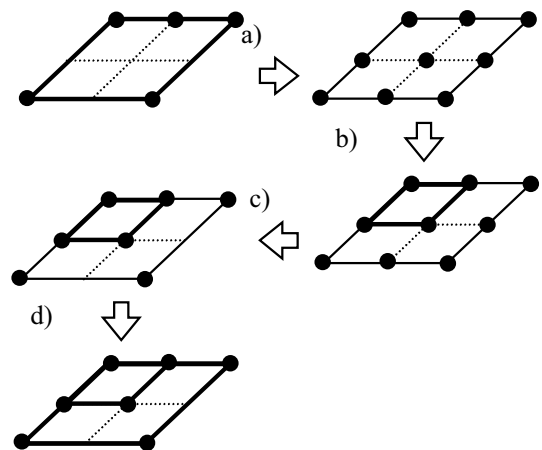


図3 再構築処理の概要

Fig. 3 Outline of the remodeling process

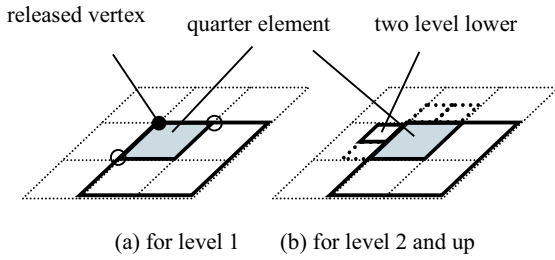


図 4 再構築処理におけるクォータ要素の生成条件

Fig. 4 Condition of generating quarter elements during the remodeling process

必要性の判定が容易なフェーズ2で不要なものを削除することにする。

フェーズ2では、フェーズ1で臨時に生成した中点頂点のうち不要なものを削除したのち、クォータ要素が生成されなかった領域のみを占めるように親要素を再構築する。クォータ要素がすべて生成された場合には、親要素を対応するLUTから削除する。

なお、クォータ要素の生成や、親要素の再構築処理では、要素内の弾性力の再計算等も行う必要がある。

クォータ要素の生成条件は、親要素がレベル1の場合と、それ以外の場合とで異なる。

図4(a)は親要素がレベル1の場合を示す。この場合には生成を判定するクォータ要素の4つの頂点のうち隣接するレベル0の要素と頂点共有関係にある3頂点を参照する。これら3頂点のうちいずれかの頂点の共有解放が検出された場合(図5(c)の状態)には、このクォータ要素(図5(c)の網掛けされた要素)は物体表面に出現したことになるので、このクォータ要素を生成する。

次に、図4(b)に親要素がレベル2以上の場合を示す。一般に、レベル n の要素に隣接する要素はレベル $n-1, n, n+1$ のいずれかでなければならないので、生成を判定するクォータ要素にレベル $n-2$ の要素が隣接している場合、このクォータ要素を生成する。判定に際して隣接要素はあらかじめ生成されている必要があるが、レベル $n-2$ の隣接クォータ要素は、レベル $n-1$ の要素から生成されたクォータ要素であるので、レベル数の小さい順に処理をしていけば、レベル n の処理が行われる時点ではレベル $n-2$ の隣接クォータ要素の生成はすでに完了している。

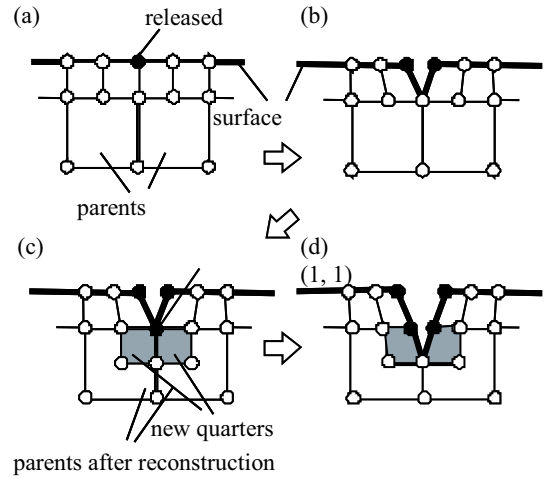


図 5 再構築処理におけるクォータ要素の生成

Fig. 5 Actual generation of quarter elements during the remodeling process

4. ふわふわ物体玉入れゲームの試作と実演

4.1 ゲームの試作

方形領域の空間内で、ジョイスティックで操作できる円形の剛体マニピュレータによるリアルタイムの対話操作環境を実現した。図6に対話操作の実行例を示す。円の領域を占めるボクセルデータを入力として、可変弾性要素を自動的に配置したモデルを生成し、剛体マニピュレータを対話操作することにより切断する。なお、現状では弾性要素間の衝突判定は行っていないため、切断により分離された要素同士に重なりが発生している。

また、開発にはPC/AT互換機を用い、ソフトウェアはVisual Studio.Net (WindowsXP)を使用した。また2次元による仮想空間の構築、およびジョイスティックによるフォースフィードバック機能の制御にはMicrosoft社が提供するDirectX9を用いた。

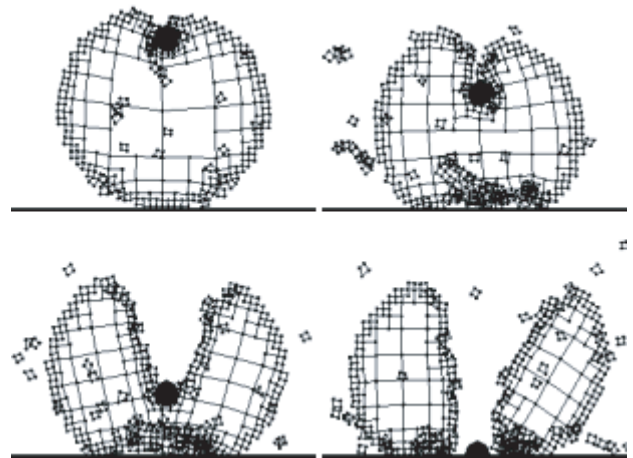


図 6 切断操作に伴うモデルの再構築の様子

Fig. 6 Sequence of a remodeling process based on a cutting operation

4.2 街の中のメディア祭での実演

街の中のメディア祭は、複数の人が同時にオープンスペースやパブリックスペースで見るメディアや対話するメディアの活用について話し合うイベントである。このイベントは愛知県内の大学や企業、自治体等が協力して運営する「街の中のメディア研究会」が主催し、新しいメディア技術を使って街の中に賑わいをもたらす場を生み出していくことを目的としており、最新のディスプレイ装置の紹介、新鋭メディアクリエイタ作品のディスプレイ装置での上映、大学による最新のメディア研究紹介、最新メディア機器を活用した催しが会場にて行われた。(図7)



図7 街の中のメディア祭
Fig.7 Event on 'the use of media in the city'

筆者らのグループも今回、物理シミュレーションのエンターテインメント応用を目的として一般の参加者に利用してもらうため、試作したゲームを本イベントで展示した。同時に現在開発中の3次元モデルバージョンも展示した。3次元による試作品は崩壊モデルを実装していないものである。

イベントが行われた場所は名古屋市矢場町のメディアパークで、日頃人通りが多く、また開催期間も週末であったため多世代にわたる多数の参加者に利用してもらうことができた。参加者に対しては、事前に詳細な説明をせず、一般的な「玉入れ」と同様にゲーム画面に表示されるマニピュレータを操作して仮想物体を3つの棒に囲まれた領域の中に入れるということだけを伝え、実際に操作してもらった。



図8 メディア祭での展示
Fig.8 The exhibited booth at the event

4.3 考察と今後の課題

今回試作したゲームを、名古屋市で行われた映像機器展示イベント「街の中のメディア祭」で出展し、一般参加者に試用してもらった。

参加者が本ゲームを試用している際に興味深い点がいくつかあった。実は玉入れの目的となる3つのバーからなる玉を入れる領域は操作する玉よりも小さくなるように配置してあった。参加者の操作はここで大きく2つの方法に大別された。一つ目は、仮想物体の収縮の性質を利用し、物体が壊れない程度に力をかけ、変形させて枠の中に押し込む方法であり、もう一つの方法は仮想物体の崩壊の性質から、仮想物体を適当な大きさになるように削り、枠の中に入る程度になってから玉入れを完了するという方法であった。崩壊モデルの実装が、今回のゲームの目的を達成するための手段に対する自由度の増加を表しているものと思われる。

またどちらか一方の方法で玉入れを完了した後、残る一方法でゲームをリトライする参加者も多く見られ、参加者がより直感的な操作で仮想物体を操作することに対して興味を伺わせる試行が多く見られた。

中には思い切って仮想物体を真二つに分離させたり、すべての要素が仮想物体を構成する最小の単位になるまで粉々にしてみる、また、ごく一部ではあるが仮想物体が崩壊する際にみられるクォータ要素の変化や再構築の様子を観察する参加者もいた。これらの参加者の中には我々がまだ実装していない崩壊後の要素同士の衝突判定についての質問を受けるケースもあった。個々の要素同士の衝突判定には膨大な計算量が伴うため、現在は省略しているがこれを実装することにより、よりリアルで興味深い映像が示せるものと予想される。

また、今回の展示では弾性と崩壊の性質を持つ2次元による玉入れゲームと、崩壊の性質を実装しない3次元による開発途中の試作品を併せて展示したが、参加者の中からは、3次元で仮想物体が崩壊するところをぜひ見てみたいとの声も多く聞かれた。3次元空間上での崩壊モデルの実装は今回展示した2次元のものよりもさらに多くの計算処理が必要となるため、より効率的に演算を行うアルゴリズムの開発等が重要になると考える。

今回の展示により、簡単な操作デバイスを利用し物理シミュレーションを応用したゲームを示すことによって、PCを身近に感じる人達はもちろん、PC操作に不慣れな高齢者や子供達にも非常に興味を持って体験してもらうことができたと思う。

5. ま と め

本研究では、物理シミュレーションのアミューズメント分野への応用の観点から、弾性物理シミュレーションによるゲーム性の高いシステム、すなわち柔らかい弾性と崩壊の性質を有する仮想物体（ふわふわ物体）をフォースフィードバック付ジョイスティックでうまく力を加えながら玉入れ操作ができる対話システムを試作した。仮想物体を構築するにあたり、可変解像度モデルとモデル形状の分解に応じた要素の動的再配置機能を実現した。対話システムの構築には、一般に普及しているWindowsPC 上での利用を考慮し実装を行った。

また、構築したシステムを「街の中メディア祭」で出展し、一般の人に操作を体験してもらった上でのシステム問題点や今後の開発方向性について検討を行った。

今後は、検討した結果を元に本システムをより拡張し、弾性物理シミュレーションの更なる応用を行ってゆくほか、アミューズメント分野に限らず多方面での応用を検討してゆく予定である。

謝辞

本研究の一部は、堀情報科学振興財団学術研究助成、文部科学省私立大学ハイテク・リサーチ・センター補助金による。

文 献

- [1] D.Terzopoulos, J.Platt, A.Barr, K.Fleisher, “Elastically Deformable Models”, *Computer Graphics*, 21(4), pp.205-214, 1987.
- [2] 宮崎慎也, 山田雅之, 長谷川純一, 安田孝美, 横井茂樹, “弾性要素数削減に基づく弾性体モデルの運動計算の高速化”, *日本 VR 学会論文誌*, 8, 1, pp. 85-91, 2003.
- [3] O.Zienkiewicz, J.Zhu, “Adaptivity and Mesh Generation”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 34, pp.783-810, 1991.
- [4] 河合裕文, 松宮雅俊, 佐藤哲, 山澤一誠, 竹村治雄, 横矢直和, “弾性体のバネモデルの疎密表現による計算量削減手法”, *日本 VR 学会第 5 回大会論文集*, pp.229-232, 2000.
- [5] 本間達, 若松秀俊, “リアルタイムで切離可能な仮想粘弾性物体の構築”, *日本 VR 学会論文誌*, 6, 2, pp.137-143, 2001.
- [6] 田中厚子, 広田光一, 金子豊久, “力覚をとまなう変形・切断操作による造形作業”, *日本 VR 学会論文誌*, 4, 3, pp.573-583, 1999.
- [7] 田中厚子, 広田光一, 金子豊久, “仮想空間における切断作業”, *日本 VR 学会論文誌*, 3, 2, pp.47-53, 1998.
- [8] 中尾恵, 小山博史, 小森優, 松田哲也, 高橋隆, “軟組織の形状・物理特性に基づいたリアルタイム切開シミュレーション手法と医用実測データの適用”, *日本 VR 学会第 6 回大会論文集*, pp.417-420, 2001.
- [9] 佐野明人, 藤本英雄, 竹内博良, “手術シミュレータのための柔軟物モデリング”, *日本 VR 学会第 7 回大会論文集*, pp. 175-176, 2002.
- [10] 広田光一, 金子豊久, “仮想物体の弾性モデルに関する検討”, *計測自動制御学会論文集*, vol.34, No.3, pp.232-238, 1998.