

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19300034
 研究課題名（和文） 弾性仮想物体の動的変形特性の力覚表現
 研究課題名（英文） Haptic presentation of dynamically deformable object
 研究代表者
 広田 光一（HIROTA Koichi）
 東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授
 研究者番号：80273332

研究成果の概要：

仮想環境における弾性仮想物体の操作と反力のフィードバックを実現するための手法として、インパルス応答変形モデルを提案し、その実験的実装と有効性の検証をおこなった。具体的には運動と変形のモデルを分離することで運動する変形物体を表現する手法、面的接触を効率的に扱うための仮想の自由度の導入手法、自由度の自乗に比例するデータ量をもつインパルス応答を幾何学的近傍での類似性に基づいて圧縮する手法、近年普及の著しいグラフィックスハードウェアを用いた処理の高速化手法などを開発した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2008 年度	3,200,000	960,000	4,160,000
総計	6,100,000	1,830,000	7,930,000

研究分野：バーチャルリアリティ、ヒューマンインタフェース

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学・データベース

キーワード：マルチモーダルインターフェース、アルゴリズム、ハプティックス、触力覚提示

1. 研究開始当初の背景

力覚提示については装置の実用的な実装技術がおよそ確立され、研究の関心はこのような装置によって仮想空間とのインタラクションにともなう力を計算するための力覚表現手法や計算アルゴリズムへと移りつつある。このような研究領域は Haptic Rendering と呼ばれている。コンピュータグラフィックス(CG)のレンダリングとの類似を意識した用語であり、触覚シーンにある様々な対象について、それぞれの特徴を踏まえた表現手法を検討するものである。CG との特徴的な違いは、シーン全体をレンダリングする必要がないことと、その一方で 1kHz 程度といわれる高いレート(力覚レート)での実時間計算が求められることである。古典的には指先を代表

する点と物体表面との接触計算、空間分布データの可触化などの検討がおこなわれてきたが、近年では剛体相互の干渉の際の力の計算なども可能になってきた。一方、重要性が指摘されつつ十分な解決が得られていないのが、柔軟物体の変形操作にともなう力覚表現である。

柔軟物体操作の力覚計算は、モデルの性質(弾性・塑性、静的・動的)や計算精度によって実現の難易度が異なる。厳密性の高い有限要素法(FEM)の計算には様々な高速化手法が提案されており、静的な問題については力覚レートでの計算がある程度可能になっているものの、動的な特性の表現については現在の計算機的能力では実用的な規模の問題を解くことができない。FEM に代わるモデルおよび解法としては、バネ・質点系のネット

ワーク(バネモデル)を前進型解法で解く手法がしばしば用いられる。バネモデル自体は表現対象によっては適切な近似と考えられる場合もあるが、この解法で動特性を表現するために離散時刻みを挙動の時間スケールに対して十分小さくする必要があり、FEMのような動的な釣り合いを求める陰解法と比較して必ずしも有利とはいえない。この計算量の問題の一つの解決方法として、記録・再生による力-変形関係の提示の考え方が提案されている。力覚のみに焦点を当てた研究としては、指先と物体との衝突の際の振動を事前に記録・モデル化しておき、提示時には衝突の速度などに応じて振動を再生することで、物体の硬さの感覚を与える試みが知られている。弾性物体の質感の表現に動特性の表現は不可欠であることが示唆されている。より洗練された手法としては、力の作用に対する状態空間中での遷移を計測・モデル化しておき、これに基づいて動的な変形を表現する方法などが提案されている。しかしながら、これらの試みはいずれも操作の自由度が非常に限定されたものとなっていた。これは、記録・再生の手法がもつ操作の自由度や精度とデータ量とのトレードオフという本質的な問題に起因している。

2. 研究の目的

本研究は、報告者らがこれまで提案してきたインパルス応答変形モデルの考え方をベースに、操作自由度の拡大とデータ圧縮の手法を確立することで、汎用性のある実用的なモデルへと発展させることを目的とした。具体的には、(1)物体全体の運動と物体表面の変形とを分離してモデル化する手法の確立、(2)平面や球面などの面的接触に対する応答のモデル化手法の提案、(3)変形の時系列変化の類似性と時間遅れを考慮してインパルス応答のデータを効果的に圧縮する方法の確立、(4)圧縮されたデータをもとに実時間インタラクションを行うための計算の高速化手法

の開発、について検討を行った。

3. 研究の方法

(1)運動モデルと変形モデルの分離

外力が一切働かない空間において、物体が静止しているとする。この物体に単位インパルス力が作用すると、物体には変形が生じるとともに、物体全体に並進運動と場合によっては回転運動が生じる。十分に時間が経過すると、物体の変形成分については次第に減衰して消滅し、最後には並進および回転の運動成分のみが残る。本研究では、物体に与える力と、物体の変形成分および重心の運動成分との間に近似的に線形性が成り立つこと仮定する。厳密には、変形が減衰するまでの間は慣性行列が変化するために角速度は一定ではなく、また角速度と、遠心力による変形成分への影響との間には非線形性がある。しかしながら、変形および角速度が小さければ、これらの影響は小さく無視することが可能であると考えられる。本研究ではこれらの考え方にもとづいて、物体の変形成分と運動成分の分離を行うこととする。再生時には、インパルス応答変形モデルと剛体シミュレーションとを併用した手法をとることで、動的な変形と運動を伴う力覚インタラクションを実現する。

評価実験では、モデルとして、自由ノード 866、表面パッチ 1728 で構成される立方体モデルを用いた。物理的特性は、辺の長さ 0.1m、ヤング率 $E=2000\text{N/m}^2$ ポアソン比 0.49、密度 110kg/m^3 とした。インパルス応答モデルとしては、500Hz で 1 秒間分のインパルス応答を使用した。つまり、各自由度ごとに 500 サンプル分のインパルス応答行列要素を用いた。インタラクションの様子を示す図 1 に示す。図 1(a)は、立方体が自由落下して床に衝突後跳ね返る様子である。衝突と慣性力に起因する変形と運動が表現されており、比較的素早い変形がみられる。図 1(b)は 2 指による操作の例であり、ユーザは 2Hz で立方体を

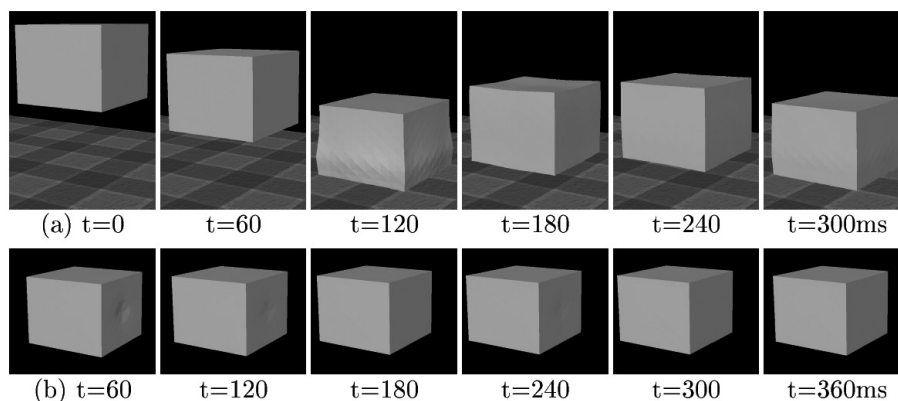


図 1 変形物体の運動と変形物体に対する操作

左右に振っている様子である。指先点から立方体に変形と運動が与えられていることが確認できる。

(2) 仮想の自由度の導入

インパルス応答変形モデルでは、これまでノードに局所的な力が作用する状況を想定してきた。しかしながら、変形対象物と環境とのインタラクションでは対象が床と衝突するなど、面的衝突をともなう力の作用が生じる場合がある。本研究ではこのような面的衝突を近似的に扱う手法として、仮想の自由度の考え方を導入する。すなわち、面の衝突にともなう力と変位の関係を、これまでのインパルス応答変形モデルと同様に記録しておき、これをもちいて、力および変形の計算を行うものである。この新しい自由度は、ノードの自由度とは1対1には対応しないため、モデルの新たな自由度として追加されることになる。

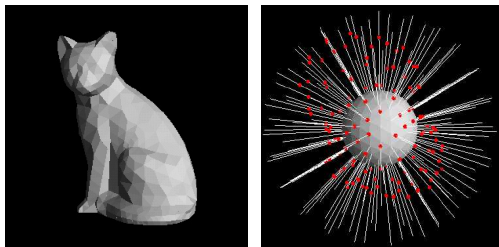


図2 形状モデルと仮想の自由度

この考え方および実現可能性を検証するために、無限平面との衝突について、その実装を試みた。平面は対象に対してあらゆる方向から接近することが考えられ、対象の形状の定義から対象と接する面、すなわち接平面を求めることができる。これらの接平面の内部に構成される領域が仮想の自由度により構成されるモデルとなる。このモデルは、(摩擦を考慮しない場合には)各ノードが法線方向に1自由度だけを持っているという点でこれまでのインパルス応答変形モデルとは異なるが、インパルス力に対する時系列の応答を保持するという点では同様であり、統合し

て扱うことができる。

評価実験では図2(左)に示すモデルを用いた。このモデルは、四面体要素数2,421、ノード数690(表面ノード数534)、表面パッチ数1796である。物理的パラメータは、サイズ(高さ)約20cm、ヤング率 $1.9 \times 10^3 \text{N/m}^2$ 、ポアソン比0.40、密度 1100kg/m^3 とした。仮想の自由度は物体の中心から162方向を用いた。全天周方向をほぼ均等に分割するために、正20面体をもとにしたジオデシックドームの頂点方向を用いた。これにより得られた仮想の自由度モデルを図2(右)に示す。このモデルのインパルス応答変形モデルを求めたためには、点ではなく面による衝突のシミュレーションを行う必要がある。このシミュレーションには市販のFEM解析ソフト(RADIOSS, Altair Engineering)を用いた。提案手法によるモデルと床面とのインタラクションの様子を図3に示す。モデルが平面の床と接触し変形をしながらバウンドする状況を表現することができている。

(3) インパルス応答モデルの圧縮

インパルス応答は、作用自由度あるいは計測自由度が幾何学的に近傍に位置する場合には相互に類似した変動となることが多い。そこで、力の作用した自由度 i と変形を生じた自由度 j が与えられたときのインパルス応答 $r(i,j)$ が求められているとし、これらをより少ない数の代表により置き換えることを考える。変形が物体中および物体表面を伝播することによる時間遅れや減衰を考慮し、 $K \times r(I,J,S)$ にて近似することとする。 K は波形をスケール倍、 S は波形を時間軸方向にシフトするためのオフセットのパラメータを示す。再生時の補間処理のために、各 $r(i,j)$ に対して、 (K,I,J,S) の組を3つまで求めるものとする。ここに、 K,S は、 $r(i,j)$ と $K \times r(I,J,S)$ との相関係数 R を最大にする (K,S) とする。

処理に先立ち、 $i=j$ となる応答 $r(i,j)$ 全てを代表の応答として保持しておく。その上でまず、これらの代表応答の近傍の自由度を探索することで、それらを代表応答により近似することを試みる。具体的には、幾何学的な接続関係をもとに自由度をたどり、その応答を

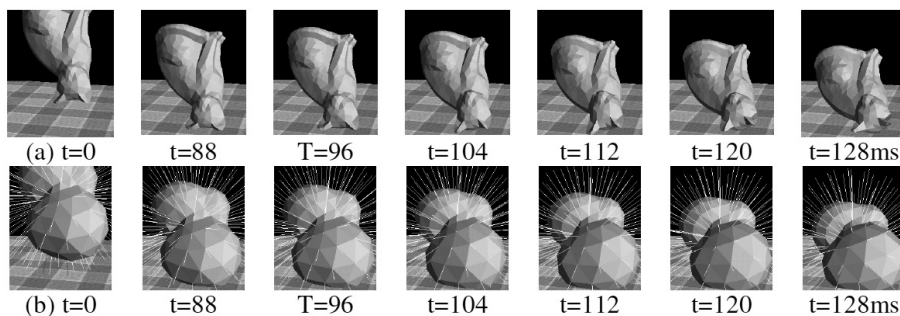


図3 仮想の自由度を用いた物体モデルと床面の衝突

上述の近似により表現する。実際のインパルス応答との近似表現と相関係数が閾値 R_{th} を超えている場合にはこれを採用する。一つの代表応答からの探索が終了したら、新たな代表応答を選定してそこから探索を再開する。選定の基本的な考え方は、すでに計算されている近似表現で求められている相関係数ができるだけ小さいものを選ぶと言う事である。これは、近似の低い自由度の領域を新たな代表応答によりカバーすることを意図している。

再生時において、提示される力の連続性は重要なポイントの1つである。ある代表領域から異なる代表領域に指先が移動する場合は考えると、指先が接触するノードの代表が他の代表に切り替わった瞬間、インパルス応答が大きく変化し、連続性の維持が難しくなることが考えられる。そこで本研究では、代表応答の間での補間を導入する。具体的には、全ての代表でない $r(i,j)$ について、3つの代表からそれぞれの重みを相関係数の加重平均により決定する。

評価実験では4面体要素数2421、表面自由ノード数359のモデルを使用した。すなわちインパルス応答 $r(i,j)$ の総数は、それぞれのノードが3軸方向の自由度を持つことから、 $(359 \times 3)^2 = 1159929$ であり、インパルス応答全体のデータサイズは、float型を用いて無圧縮の場合、約2.16GBとなる。提案手法による圧縮を行った場合の圧縮率を表1に示す。相関係数の閾値 R_{th} が0.80の場合はデータサイズを1%程度、閾値が0.95の場合であってもデータサイズを13%程度に抑えられることが示された。

相関係数の閾値 (R_{th})	0.80	0.85	0.90	0.95
代表ノード数	12974	26582	59109	158231
従属ノード数	1146955	1133347	1100820	1001698
圧縮率	1.1%	2.3%	5.1%	13.6%
データサイズ [GB]	0.02	0.05	0.10	0.29

表1 相関係数の閾値と圧縮率

(4)変形計算の高速化手法

GPUのアーキテクチャは、シンプルな演算ユニットを多数搭載し、これらが並列に動作する構成になっている。したがって、行列計算のように並行性の高い演算処理を行う場合、少数で複雑な構成を備えた同規模のCPUと比べて高い処理性能が得られる。一方で、バス幅の制約やDRAMの特性からメモリアクセスに非常に厳しい制約がある。すなわち、効率的なデータアクセスのためには、並列に動作する演算ユニットがメモリ上の連続するアドレスをアクセスする必要がある。

上述の筆者らの手法は、その並列性から

GPUによる処理の効果を期待することができるが、並列化とメモリアクセスの連続化の観点では、GPUによる計算に対する配慮が不足している。そこでGPU/CUDAに適用できる仕組みを作るために以下のような工夫を行った。なお、以下の議論では、補間等の計算のために、力が同時に複数の自由度に作用することを前提とし、これを数え上げるインデックス k を用いて、力の作用自由度番号 i を $f[k][t]$ 、その作用力を $F[k][t]$ と表現している。

従来のCPUによる計算では、次の処理を行っていた。

```
for(j=0;j<N;j++){U[j]=0;
  for(t=0;t<T;t++){
    for(k=0;k<M;k++){
      U[j]+=a[f[k][t]][j]×Rc[r[f[k][t]][j]]
      [t-s[f[k][t]][j]]×F[k][t];}}
```

ここに、 N は自由度の数、 T は畳み込み演算をおこなう時間のステップ数、 M は同時に力の作用する自由度の数、 $U[j]$ は自由度 j における変位である。

この計算は、すべての変形自由度の現在の変位を過去の力作用から求めるという考え方に立っていた。この方法は、直感的ではあるが、上述のようなGPUの特性には適合しない。 Rc の参照に関わるすべてのインデックスがテーブル参照により決定されるため、連続的なデータアクセスの実現が難しい。提案手法では、変位の将来の値を持つバッファを設けて(すなわち、変位 $U[j]$ が将来の時間 t というパラメータをもつ $U[j][t]$ に変わる)各時間ステップで力が与えられる毎に、将来の変位への影響を計算するという考え方に立っている。すなわち、各サイクルの計算においては、 f および F については現在の値 $f_0[k]$ および $F_0[k]$ のみを用いることになる。

```
for(j=0;j<N;j++){
  for(t=0;t<T;t++){
    if(t<T){U[j][t]=U[j][t+1];}else{U[j][t]=0;}
    for(k=0;k<M;k++){
      U[j][t]+=a[f_0[k]][j]×Rc[r[f_0[k]][j]]
      [t-s[f_0[k]][j]]×F[k];}}
```

これにより、 t について連続なデータを扱う処理とすることが可能になる。実装では、さらに、変形を更新レートの間隔で計算し、その間の時間については計算を省略することで、計算量を削減している。GPU/CUDAでは並列化の単位としてスレッドとブロックを定義しており、ここでは、時間のインデックス t をスレッドに、また、変形自由度 j をブロックに展開して並列に実行している。

評価実験では、CPU環境とGPU環境での計算時間の比較を行った。モデルは表面ノード数359(自由度数 i および j はともに359

×3=1077) インパルス応答の時間サンプリング数は512、力の更新レートは500Hz、視覚更新レートは32Hzの条件を仮定した。CPU環境による処理は平均3.77ミリ秒程度であったのに対して、GPUは平均1.05ミリ秒程度となった。したがって、平均値で比べると、GPUでの計算速度はCPUより約4倍を示し、視覚表示の32Hzでの更新に必要な処理時間を満たすことが確認された。

4. 研究成果

以上をまとめると、本研究では次の成果が得られたと考えている。(1)変形対象の運動と変形を分離してモデル化し、インタラクション時に統合して用いる手法を提案した。これにより、近似ではあるものの、運動する変形物体とのインタラクションを実時間で表現することを可能とした。(2)対象に対する面的接触をインパルス応答変形モデルの枠組みで等価に扱うための手法として仮想の自由度の手法を提案し、その実現可能性を確認した。(3)近傍のノードに対する操作-変形関係の類似性を考慮したインパルス応答モデルのデータ圧縮手法を提案した。これにより、1/100近い圧縮が可能であることを明らかにした。(4)グラフィックスのハードウェアを利用した変形表現計算の高速化手法を提案しその効果を確認した。このようなハードウェアではメモリアクセスの連続性が求められることから、これに適した計算アルゴリズムを考案した。

仮想環境の利用技術が普及していく中で、将来的には変形する仮想物体の力覚を伴う表現が求められるようになると考えられ、本研究で得られた知見は、その実現に寄与するものと考えている。とくに、データの圧縮手法はインターネットにおけるモデルの配信に重要な技術要素であり、また、グラフィックスハードウェアを利用した高速化は、いわゆるパソコンのような汎用環境でのインタラクションに不可欠な技術であると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

[1] 田川和義, 広田光一, 廣瀬通孝: 力覚インタラクションのための動的変形モデル; 電子情報通信学会和文論文誌 D, J90-D(9), 2615-2623, 2007.

〔学会発表〕(計10件)

[1] Kazuyoshi Tagawa, Koichi Hirota, Michitaka Hirose: A Data Compression Method for Impulse Response Deformation Model; World Haptics 2009, 2009/3/20, Salt Lake City (USA).

[2] 李志成, 田川和義, 広田光一: CUDA に

よる仮想柔軟物体の変形表現の検討; 日本VR学会 力触覚の提示と計算研究会 第1回研究会, 2009/1/26, 横浜.

[3] Kazuyoshi Tagawa, Koichi Hirota, Michitaka Hirose: PONYO-PONYO!; ICAT 2008 (demonstration), 2008/12/1-3, Yokoyama.

[4] 田川和義, 広田光一, 廣瀬通孝: インパルス応答変形モデルのための柔らかさ情報の圧縮手法の検討~圧縮率の向上; 日本VR学会第13回大会, 2008/9/24, 奈良.

[5] Kazuyoshi Tagawa, Koichi Hirota, Michitaka Hirose: Surface Contact Interaction with Dynamically Deformable Object using Impulse-based Approach; EuroHaptics 2008, 2008/6/12, Madrid (Spain).

[6] 田川和義, 広田光一, 廣瀬通孝: インパルス応答変形モデルのための柔らかさ情報の圧縮手法の検討; 第48回ヒューマンインタフェース学会研究会, 2008/6/2, 東京.

[7] Kazuyoshi Tagawa, Koichi Hirota, Michitaka Hirose: Manipulation of Dynamically Deformable Object; IEEE Haptics 2008, 2008/3/13, Reno (USA).

[8] 山崎貴史, 田川和義, 広田光一, 廣瀬通孝: 動的な変形と運動を伴う柔軟物体の力覚表現-トルクの考慮; 日本VR学会第12回大会, 2007/9/19, 福岡.

[9] 田川和義, 広田光一, 廣瀬通孝: 柔軟物体との力覚インタラクションにおける物体運動の考慮方法の検討; Human Interface 2007, 2007/9/5, 東京.

[10] Kazuyoshi Tagawa, Koichi Hirota, Michitaka Hirose: A Study on Haptic Interaction and Simulation of Motion and Deformation of Elastic Object; HCI International 2007, 2007/7/23, Beijing (China).

6. 研究組織

(1)研究代表者

広田 光一

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号: 80273332

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

田川和義

東京大学・インテリジェント・モデリング・ラボラトリー・研究員

研究者番号: 40401319