

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21300041

研究課題名（和文） 実対象物の計測に基づく動的変形特性の記録と再生

研究課題名（英文） Measurement and Presentation of Dynamically Deformable Elastic 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（和文）：

弾性変形する柔軟物体の動的な変形特性を実対象物の計測にもとづいてモデルとして獲得し、このモデルとのインタラクションを可能とする技術について、その基礎の確立を試みた。対象物に対する力作用と変形応答の関係をインパルス応答として表現するモデルを用い、実対象物の変形のインパルス応答を計測する手法を開発した。また、モデルに対する操作力および変形の計算を高速化するアルゴリズム、変形の特性に着目したモデルデータの圧縮手法を開発した。

研究成果の概要（英文）：

This research was aimed at investigating approaches to acquire models of deformable objects based on measurement and developing technology to realize haptic interaction with the acquired model. We employed the Impulse Response Deformation Model (IRDM) as a model to represent deformation and devised a method to measure impulse response of real deformable object. We also developed a fast computation algorithm of interaction with the model and a data compression method based on the redundancy of the IRDM.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2010年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2011年度	2,900,000	870,000	3,770,000
総計	13,800,000	4,140,000	17,940,000

研究分野：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：バーチャルリアリティ、ハプティックス、変形モデル、変形計測

## 1. 研究開始当初の背景

変形する対象物のモデル化と表現の実現は古くからCGの領域で多くの研究がなされている。古典的にはバネマス系モデルやFEMなどによるシミュレーションが用いられてきており、実時間でのインタラクションのために高速化手法も検討されてきた。

最近ではVRの分野で視覚だけでなく力覚を伴うインタラクションの実現が検討されて

いる。力覚提示の実現には1kHz程度以上の更新レートが必要であるとされるが、上述の力学的シミュレーションを実用的な解像度のモデルについて実時間で実行することは難しい。このために、静的な線形モデルの近似、変形に応じたメッシュの再分割などが試みられている。

一方で、力学的なシミュレーションによらない変形あるいは力覚表現の可能性が検討さ

れている。古くは、衝突の際の振動をシミュレーションではなく記録波形の再生により提示することで対象物の硬さなどについての力覚的現実感が向上することが報告され、その後、リアリティベーストモデリング、計測ベースアプローチ、ハプティックビジョンなど、テクスチャや柔らかさ、さらに対象物についての知識にまで記録再生の概念が応用されるようになってきた。変形特性についても、実対象物の計測ではないが、実時間インタラクションを可能とする試みとして、状態空間によるモデル化手法や申請者らのインパルス応答変形モデルなどの提案がなされている。

実物体の計測に基づく変形モデルの構築は、理論的には力-変形関係から物理パラメータを推定する逆問題として定式化することができるが、計算量や計測誤差の影響の問題から、一般的に利用できる状態にはない。人工的に作られた物体にマーカを埋め込むことでその物体の変形を計測する手法が提案されているが、実物体一般に適用できる手法とは言えない。

インパルス応答変形モデルの基本的な考え方は、対象物の変形特性をインパルスの力に対する時系列的な変形として記録するということである。変形の線形性を仮定することができれば、力の時系列的な作用に対して、このインパルス応答をたたみ込むことで動的な変形を計算することができる。これまでの検討では、このモデルの再生時の実時間性に着目して、その実現の可能性に焦点を当ててきており、インパルス応答の計測もシミュレーションにより「前処理」として行っていた。この検討の中で、インパルス応答の計測は実対象物に対しても比較的容易に適用できる可能性があるとの着想を得た。

## 2. 研究の目的

変形する実対象物とのインタラクションにおける視覚および力覚情報提示を、記録・再生のアプローチにより実現することを目的とした。具体的には以下の4つの課題の解決を試みる。

### (1) 計測手法

対象物のインパルス力に対する変形応答を計測する手法を確立する。これには、対象物に対して力を作用する方法、作用した力の時系列的变化をモニタする方法、対象物の変形の時系列的变化を計測する方法、力および変形の時系列データからインパルス応答を安定に求める方法などが含まれる。

### (2) モデル構築手法

対象物のモデルを効率的に精度良く生成する手法を確立する。これには、できるだけ少ない計測点数で対象物をモデル化するための力作用点および変位計測点の選択方法、デ

ータのばらつきなどの統計的指標にもとづくモデル精度の評価方法などが含まれる。

### (3) 実時間再生手法

構築されたモデルに対する視覚的・力覚的な実時間インタラクションを実現する手法を確立する。これには、再生計算アルゴリズムの改良、計算用補助ハードウェアによる処理の高速化手法などが含まれる。

### (4) 評価手法

以上で確立された手法を、記録から再生までの一連のシステムとして評価する。これには、得られたモデルと実物体との比較によるモデルの忠実性の評価、被験者を用いた現実感や操作感の主観的評価などが含まれる。

## 3. 研究の方法

### (1) 計測手法

#### ① 変形計測手法の検討

インパルス応答変形モデルは、インパルスの力作用に対する対象物の変形応答を、物体表面上の点について、網羅的に記述したものである。以下では、物体表面上の点のことを「ノード」と呼ぶ。インパルス応答変形モデルを構築するためには、力を作用するノードと変形を計測するノードのすべての組み合わせについてインパルス応答を得る必要がある。正確には、各ノードが力について3自由度、変位について3自由度を持つことから、1対のノードについて9つのインパルス応答が得られる。このように多くの組み合わせの計測が必要であることから、作用ノード1に対して、計測ノード1を計測するのはなく、計測ノード複数を同時に計測することが望ましい。これに適した方法として、カメラによる計測を採用した(図1)。物体表面の作用点/計測点にマーカを貼りつけ、これらの3次元位置をステレオ計測する。対象物との正確な位置関係は、キャリブレーションによるカメラパラメータの推定で求めている。

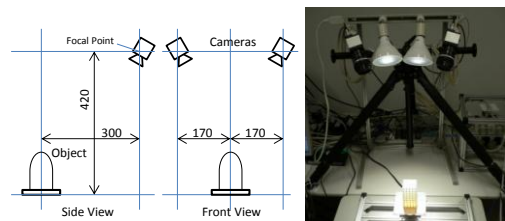


図1 高速度カメラによる変位計測システム

#### ② 力作用手法の検討

力作用手法の候補として検討したのは、棒などで押す方法、錘などをぶつける方法、空気噴流を使う方法である。棒の場合、作用力は棒の駆動力から棒の慣性力を引き算することで得られる。錘の場合、作用力は錘の慣性力に等しく、すなわち錘の加速度に質量を乗じることで得られる。いずれの方法も、棒や錘がマーカを隠してしまうことから、カメラ

による作用点の変位の計測を難しくする欠点がある。空気噴流は、非接触で力を作用させることができ、作用点のマーカをカメラから可視にすることができる。これらのことから、空気噴流を使う方法を採用した。一方、空気は不可視であるため、作用位置を示す手段が必要である。ここでは、変位センサによる位置決めを試みた(図2)。可視光のレーザ変位センサを用いることで、光軸と対象物表面が交差する点の距離を計測することができるようになる。光軸上にマーカがあり、その距離が噴流の中心と一致する距離であれば、噴流はこのマーカをほぼ中心にとらえていると考えることができる。

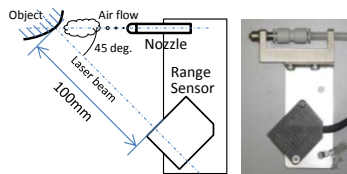


図2 空気噴流による力作用デバイス

空気噴流による力作用では、ノズルの反力が対象物への作用力と一致するわけではないことから、作用力を計測することが難しい。また、対象物が動的な変形にある場合は慣性力も発生しており、対象物の固定部が支持する力を計測しても、作用力とは一致しない。このことを考慮して、本研究では、インパルス力ではなく、ステップ力を作用する方法を考案した。噴流により力を安定に作用している状態から、噴流を停止することで、ステップ的力変化を与える。力が安定に作用している状態を持続することで、対象物は静的な変形状態となり、すなわち、この時の作用力は対象物の固定部に作用する力と一致する。噴流を停止することで空気圧の拡散により比較的短時間で力は解除され、近似的にステップ入力と考えることができる。

上述のように、力作用と変形計測にはそれぞれ3自由度があり、したがって、これらの間に9個の応答が定義される。これらを求めるために、一つの力作用ノードに3方向の力を作用させて応答を計測する必要がある。これらの力は少なくとも独立であることが求められ、可能であれば直交に近い関係にあることが望ましい。計測においてはこの点に注意する必要がある。

### ③ 安定なインパルス応答計算手法

以上で得られた作用力と変位のデータから、デコンボリューションによりインパルス応答を計算する。ここでは、上述の計測において作用力がステップ状に変化していることを仮定した。厳密には、バルブの制御や圧力の拡散などにより時間遅れが発生すると考

えられるが、バルブの閉動作に関する特性および圧力センサの応答性についてのデータがなく、定量的に考慮することが難しかった。厳密なランプ形状によるデコンボリューションは今後の課題である。デコンボリューションに加えて、各軸の自由度間のインパルス応答を得るために、直交化を行う。ステップ応答の計測結果と、これに対して上述の処理によりインパルス応答を求めた例を図3に示す。デコンボリューションの処理に微分的操作が含まれることから、インパルス応答にはノイズがおおく含まれ、後述の触感の提示においては、高周波成分を除去して用いている。

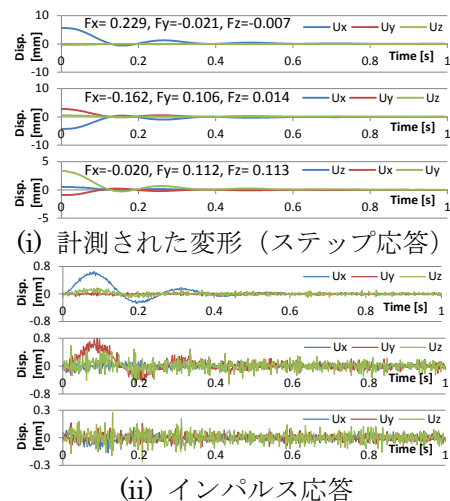


図3 インパルス応答の計算

### (2) モデル構築手法

① 力作用点および変位計測点の選択方法  
できるだけ少ない計測点数で対象物を効果的にモデル化する手法を検討した。変形は対象物の形状や力の作用点によって異なり、対象物表面上を常に均等に計測することが適当とは言えない。このことを検証し、さらに計測結果のデータ圧縮が可能であることを示すために、計測組を選択する手法について検討した。

計測により網羅的に得られたインパルス応答データのうち、作用点および計測点が近傍にあるものについては、インパルス応答が相互に類似している傾向がある。これを概念的に示したのが図4である。ある力作用ノードと変形計測ノード(これを代表組と呼ぶ)での応答が与えられているとき、物体表面上で近傍の作用ノードおよび近傍の計測ノードの間にも、類似した応答が期待されるという仮定に基づく。

近傍といえども、位置が違えば伝搬遅延や減衰の影響は考えられることから、代表組の応答の時間シフトおよび変位スケールにより近似的に表現することを考える。すなわち、代表でない組については、代表組への参



照とシフト・スケールのパラメータのみが定義され、インパルス応答のデータは保持の必要がなくなる。この処理は、データ量の圧縮に寄与することが期待される。本研究では、インパルス応答の類似性を相関係数で評価しており、時間シフトは相互相関係数を最大にするシフト量として求めている。また、以下の実験では、近傍の代表組を相関係数の高いものから上位3つまで定義して、これらの荷重平均で応答を求めている。これは、参照している代表組の切り替わりによる変形の不連続を避けるための平滑化を意図している。

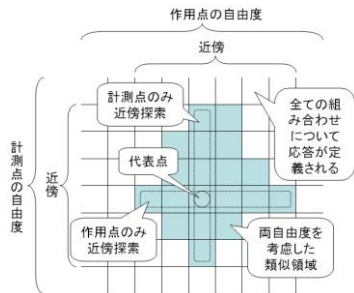


図4 代表組近傍の力-変位関係の近似

データ圧縮の効果を、シミュレーションによる実験により検証した。この実験では、上述の計測結果ではなく、下図5のモデル(自由ノード数 353)について、FEMシミュレーションによりインパルス応答変形モデルを構築したデータを用いた。このモデルに代表組による近似の処理を行った結果を表1に示す。ここに、相関係数閾値は、代表組による置き換えの可否を判断する閾値であり、また、平均相関係数①から③は相関係数の高い上位3つの代表組との相関係数である。相関係数閾値が0.9および0.8の場合に、およそ1/20およびおよそ1/100の圧縮率が得られることが確認された。

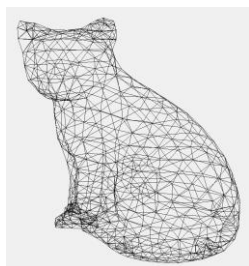


図5 実験に使用したモデル

## ② モデル精度の改善

冗長計測を行うことで、変形データの分散などの統計的指標をもとに、モデルの精度やデータの安定度の向上を試みた。対称性のある物体においては、網羅的な計測結果には、複数の等価な組についての計測が

含まれている。これらの等価な組は、対称面についての鏡面変換または対称軸についての回転変換により、本来は相互に一致するものであるが、実際には計測の誤差によりずれが生じる。これらを平均して用いることによる、インパルス応答の平滑化の効果を確認した。

表1 相関係数の閾値による圧縮率の変化

相関係数閾値	0.8	0.9	元データ
平均相関係数①	0.937	0.968	-
平均相関係数②	0.925	0.953	-
平均相関係数③	0.916	0.947	-
代表組数	12974	59109	-
圧縮率	1.10%	5.10%	100.00%
データサイズ(GB)	0.02	0.1	2.14

## (3) 実時間再生手法

### ① 力計算アルゴリズムの改良

力計算は接触点の位置と変位から力を計算する処理である。この計算の結果は力覚提示に利用されることから、力覚レート(本研究では500Hz)で実行される。上述の議論では、力作用はノードに与えられるものとしていたが、実際のインタラクションにおいては、ユーザの作用点は、ノードではなく、パッチ(3つのノードを頂点とする三角形ポリゴン)の上であり、これら3つのノードに力を分配して定義する。力計算にはこの分配の処理が含まれる。

従来の力計算手法では、変位と等価な作用力を求めるという考え方に基いて、静的な弾性係数(インパルス応答の時刻0の係数)を用いて、変位から力を計算する処理を行っていた。この方法は、一般に $3m \times 3m$  ( $m$ は力作用ノード数)の行列の逆演算を含み、すなわち、 $m$ の増加に対して計算量が $0(m^2) \sim 0(m^3)$ で増大する。

本研究では、バーチャルカップリングによる変位-力変換により $0(m)$ で計算する手法を導入し、これが問題なく機能することを確認した。この結果は、把持操作などより多くの接触点をもつ操作において効果があると期待される。

### ② 変形計算アルゴリズムの改良

変形計算の基本となる処理は、モデルに定義されるインパルス応答と作用力の履歴との畳み込み演算にある。畳み込み演算の計算時間は、変形の自由度数、同時に力を作用する作用点の数、インパルス応答の長さ按比例し、これが実用上の作用点の数を定める要因となる。

変形計算の高速化のアプローチとして、GPUによる並列処理を検討した。GPUを効果的に利用するためには、アルゴリズムの並列化と、計算順序の最適化によるメモリアクセス連

続化が必要である。

上述の代表組による近似を導入したモデルについて、このような並列化と連続化を実現する方法を図6に模式的に示す。(i)従来のコードでは、過去の力の時系列変化を記録しておき、これとインパルス応答を畳み込む考え方をとっている。ここに、 $M$  は力作用点数、 $N$  は変位ノード数、 $T$  は時間ステップ数であり、 $f$  はこれらと力作用ノードとを対応付けるテーブル、 $U$ 、 $Re$ 、 $F$ 、 $s$ 、 $a$  は、それぞれ現在の変位、代表ノードのインパルス応答、力の時系列データ、シフトおよびスケール量である。これに対して、(ii)改良コードでは、将来の応答の時系列を配列として保持し、力のデータが与えられる毎に、これに積和を加算していく考え方をとる。ここに、 $f_0$  は上述の  $f$  に対応するテーブルであるが、現在の力作用ノードのみを保持しており、時刻  $t$  の軸を持たない。一方、結果として計算される  $U$  に、時刻  $t$  の軸が付与されている。以上のようなアルゴリズムにより、時刻  $t$  によるループの並列化とメモリアクセスの連続化が可能になり、多数のプロセッサを同時並行動作させることが可能になる。

```

(i) 従来のコード
for(j=0;j<N;j++){ //変位ノード数
  U[j]=0;
  for(t=0;t<T;t++){ //時間ステップ数
    for(k=0;k<M;k++){ //力作用ノード数
      U[j]+=a[f[k][t]]*Re[f[k][t]]*s[f[k][t]]*F[k][t];
    }
  }
}

(ii) 改良コード
for(j=0;j<N;j++){ //変位ノード数
  for(t=0;t<T;t++){ //時間ステップ数
    if(t<T){
      U[j][t]=U[j][t+1];
    }else{
      U[j][t]=0;
    }
    for(k=0;k<M;k++){ //力作用ノード数
      U[j][t]+=a[f_0[k][j]]*Re[f_0[k][j]]*s[f_0[k][j]]*F[k];
    }
  }
}

```

図6 アルゴリズムの改良

この手法による性能改善の評価は完了していないが、予備実験ではCPUによる処理と比較して4倍から50倍の速度の向上が示唆されている。また、CPUとGPUのデータの授受がボトルネックになる可能性があり、計算結果を、CPUを介することなく、描画処理に渡す方法についても検討を継続している。

#### (4) 評価手法

##### ① モデル化の忠実性の評価

上述のインパルス応答の計測結果について、構成された変形モデルと実物体との挙動の

比較を行うことで、忠実性の評価を試みた。実物体を押し棒で押す操作を行い、その際の押し棒の動きをカメラで計測し、これと同様の操作を変形モデルに作用する。図7は、カメラ視点からのモデルの変形をワイヤフレームで描画して実物体の映像に重ねて表示したものである。変形形状が両者で類似していることがわかる。

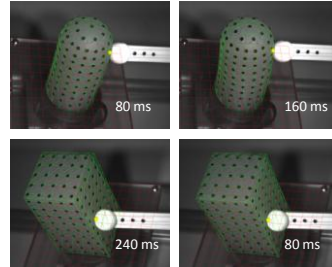


図7 実対象物とモデルとの変形の比較

なお、変形モデルには表面の摩擦のモデル化が含まれておらず、現在のシミュレーションでは、摩擦のない状態を仮定している。このため、操作に当たっては、接線方向の力作用を抑えるように配慮した。また、変形の類似性については、より定量的な比較を行いたいと考えているが、押し棒で押す操作にはマーカの隠蔽を伴い、これが、マーカとモデルノードとの3次元位置の誤差にあたる影響を避けることが難しい。今後の研究の中で、引き続き検討していきたい。

##### ② 現実感や操作感の主観的評価

記録再生された変形モデルの現実感や操作感について、被験者を用いた評価を行った。実物体に対して力覚デバイスと同様の操作インタフェース（指や棒で押す）で操作を行わせ、その際の実対象物の操作感と提案手法による操作感とを比較評価させた(図8)。

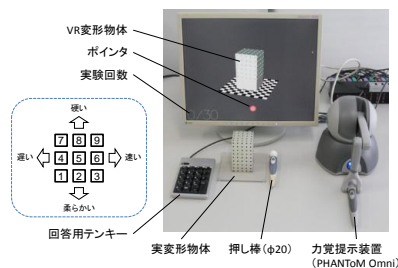


図8 評価実験の環境

モデルにおいて、時間および振幅のスケールを0.5倍から2倍の範囲で変化させることができるシステムを作成し、被験者に、実物の操作感と一致するようにこれらのスケールを調整させる。スケールの回答がいずれも1.0に近い場合には、両者が類似していると

考えることができる。なお、モデルの提示には市販の力覚提示装置を用い、実物体の操作には、力覚提示装置と同じグリッパに直径20mmの球形の接触面を取り付けたものを用いた。対象物として、ドーム形状と直方体形状のモデルを用い、被験者は8人であった。得られた結果を頻度分布として整理したものを図9に示す。時間と振幅のスケールの平均値は、ドームで1.15および1.11、直方体で1.24および1.17であり、すなわち、実物のほうが、時間と振幅ともに、わずかにスケールが大きいと評価しているが、両者に大きな違いはないことを示す結果であると考えられる。

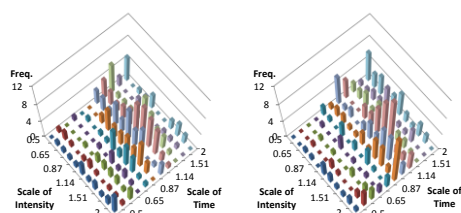


図9 調整法によるパラメータ評価  
(左：ドーム、右：直方体)

#### 4. 研究成果

##### (1) 計測手法

対象物の動的な変形をインパルス応答として記録する手法を提案し、その実現可能性を実験により検証した。

##### (2) モデル構築手法

インパルス応答モデルを構築する際のノードの冗長性について分析し、より少ないインパルス応答による近似表現手法を提案し、これによるデータ圧縮の効果を確認した。

##### (3) 実時間再生手法

モデルとのインタラクションのための計算について、処理の並列性とメモリアクセスの連続性の観点からアルゴリズムの改良を行い、これをGPUに実装することでその効果を確認した。

##### (4) 評価手法

計測により得られたモデルと実対象物との変形の比較により、モデルの妥当性を確認した。また、被験者を用いた実験により、モデルが主観的にも妥当であることを確認した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① Koichi Hirota, Kazuyoshi Tagawa: Acquisition of elastically deformable object model based on measurement; Proc. EuroHaptics 2012, 印刷中, 2012 (査読あり) (掲載確定)
- ② Kazuyoshi Tagawa, Koichi Hirota,

Michitaka Hirose: A data compression method for impulse response deformation model; Proc. World Haptics 2009, 428-433, 2009 (査読あり)

[学会発表] (計5件)

- ① 広田 光一, 田川 和義: 計測にもとづく弾性変形モデルの構築; 日本 VR 学会力触覚の提示と計算研究会 第8回研究会(HDC08), 2012.3.13 筑波大学
- ② Kazuyoshi Tagawa, Hiromi T. Tanaka: A Hybrid Dynamic Deformation Model for Surgery Simulation; Medicine Meets Virtual Reality (MMVR) 2011, Stud Health Technol Inform, Newport Beach, CA, USA, 2011.2.8-12
- ③ 田川 和義, 田中 弘美: 大規模柔軟体の特定部位を対象とした力覚インタラクションのためのハイブリッド動的変形モデル; 電子情報通信学会 MVE 研究会(信学技, 110(108), 53-56), 東京大学, 2010.06.29
- ④ Kazuyoshi Tagawa, Koichi Hirota: Record Reproduction Deformation Model for Haptic Interaction; Fifth Joint Workshop on Machine Perception and Robotics (MPR2009), Ritsumeikan University Kinugasa Campus, 2009.10.4-5
- ⑤ 広田光一, 田川和義: 記録再生型力触覚提示手法; 日本 VR 学会第14回大会, 早稲田大学, 2009.9.10 (オーガナイズドセッション/招待講演)

[図書] (計1件)

- ① Kazuyoshi Tagawa, Koichi Hirota, Michitaka Hirose: Manipulation of Dynamically Deformable Object Using Impulse-Based Approach; Advances in Haptics (Ed: Mehrdad Hosseini Zadeh), 315-331, 978-953-307-093-3, InTech, 2010

#### 6. 研究組織

##### (1) 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

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

田川 和義 (TAGAWA KAZUYOSHI)  
立命館大学 立命館グローバル・イノベーション研究機構・研究員  
研究者番号: 40401319