

実物体の挙動計測による柔らかさ情報獲得に関する研究

学籍番号 5 6 7 9 3 鄭 学

指導教官 広田 光一助教授

Abstract: We studied a way of acquiring impulse response deformation model based on measurement on real deformable object. Add impulse to a real deformable object as jelly by voicecoil motor and by measuring the real deformable object with video camera, we can get the value of response to a certain impulse. We will apply the value to a playing experimental system of reproduction. By the system, we will be able to feel as if we touch real deformable object.

Key Words: measurements , deformation , haptics.

1. 緒言

情報の伝達や提示における多感覚化・マルチメディア化の重要性が指摘されている。とりわけ触力覚情報はこれまでのメディアでは扱われておらず、新たな情報提供の手段となることが指摘されている。このような背景から、触力覚の提示を実現するためのデバイスおよびアルゴリズムに関する研究が行われている[1][2]。物体の接触の感覚の中にはさまざまな種類のものがあるが、その中で本研究は柔らかさに注目した。柔らかさ情報の検討には従来CTスキャンなどで直接物性値の分布を計測する手法が提案されているが[3]、装置のコストや実時間の計測の困難さが問題である。そこで、本研究では、実物体につけたマーカの変位をビデオカメラでの撮影により計測し、そこから柔らかさ情報を獲得する事を検討した。これは、筆者らが提案しているインパルス応答変形モデル[4]を実測によって獲得するという事である。

2. インパルス応答変形モデルとは

インパルス応答変形モデルとは簡単に説明すると、柔軟体にインパルス力を加えたときに生じる波面を予め計測しておき、これを入力に応じて畳み込んでリアルタイムに合成することで変形を求め、力覚表現する方法の事である。そしてこのインパルス応答変形モデルは動的変形をマクロに記述し、かつ力覚のリアルタイムインタラクションを可能とする適切なモデルであると考えられる。それを利用して柔らかい物体を触る事が可能となるが、このようなモデルの研究は仮想のモデルデータが前提となっている事がほとんどで、現実と高度に整合した触覚表現は実現されていない。このモデルも、それに対応する実物体挙動計測からインパルス応答を求める手法は確立されていない。よって、実際に実柔軟物

体の挙動を計測による明らかにし、そこから得られたインパルス応答データを用いてインパルス応答変形モデルにて再生して、実物体と同じ応答データを得ようと考えた。図1にインパルス力を与えた時の仮想物体の時系列の変形例を示す。

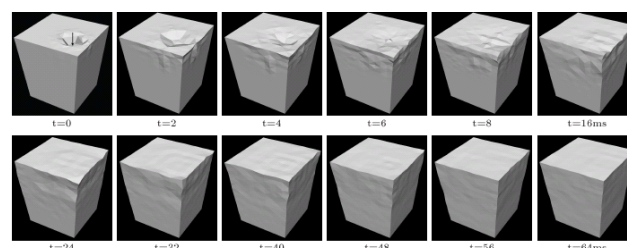


図1 インパルス応答の時系列変化

3. 本研究のアプローチ

3.1 計測と実験の概要

本研究では、中央の平面上の面内方向の力による変形のみを対象とする。幾何学的（物理的）に対称であるから2次元のモデルで記述が可能である。また、計測手法の確立に主眼があることから、変形を生じる作用力は1点1方向のみとする。インパルス応答変形モデルは、インパルスのな力を作用した際の物体上の各点での変位を記録するモデルであり、実物体に対してインパルスのな力を作用した場合の作用力の計測手法、それに伴う変形の時系列的な計測手法などを確立する必要がある。

3.2 変形の計測

計測の対象としては、柔らかい立方体型の実物体（ゼリーなど）を用いる。座標系を下の図2に示す。その側面と平行な中心の平面上（つまり図2のy=0平面上）にマーカを複数配置し、そのうちの中央のマーカ位置にボイスコイルモータでインパルス力を与える。マーカはその平面内を動くことと仮定して、1

台のビデオカメラにより測定する。また、測定時と同じカメラアングルで立方体の枠組みを撮影し、キャリブレーションして、それをういマーカの 3 次元座標を求める。変形は $y=0$ の平面で生じることから、求めた座標は (x,z) のみが意味をもつ。

3.3 インパルスのな力の計測

マーカの加速度を a 、ボイスコイルモータの出す電流を I 、力を F_{motor} 、力と電流の比例係数を K 、ボイスコイルモータの重力を mg 、ゼリーからの力を F_{jelly} とすると、運動方程式が式 (1) で書け、力の様子は図 2 の様になる。

$$\begin{cases} F_{motor} = KI \\ F_{motor} - mg + F_{jelly} = ma \end{cases} \quad (1)$$

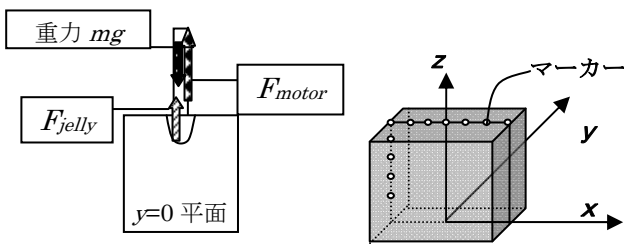


図 2 物体にかかる力の様子 と座標系のとり方
また、 a は変位 z から次の様に求めることができる。

$$a = \frac{d^2 z}{dt^2} \cong \frac{z_i - 2z_{i-1} + z_{i-2}}{\Delta t^2} \quad (2)$$

実験により変位 z と電流 I が求まるので、式 (1) (2) より F_{motor} 、 ma 、 mg は求まる。以上から F_{jelly} を求める事が出来る。

4. 実対象の計測

4.1 計測準備

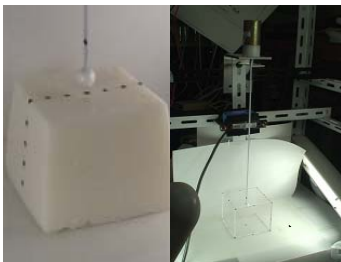


図 3 (左) ゼリーの拡大図と (右) 計測装置全体

ゼリーはゼラチン 10g を沸騰したお湯 200ml に溶かして、立方体の鋳型に流し込み、その後 300ml の牛乳を加え 10℃ の冷蔵庫にて 12 時間保管後、取り出し、つや消しペンにてマーカをつけたのち、30 分放置してから実験に使用した。最初シリコンゴムで物体を作ったが、ビデオカメラで計測するには変位が十分にでていなかったのので、ゼラチンを使う事に

した。また、鋳型のサイズは 7.92cm のアクリル製の立方体を使用した。

一方、カメラのキャリブレーションが必要である。実験では、一辺 7.92cm 型の各頂点とその中点をカメラで撮影することにより、最小二乗法によりキャリブレーションを行い、画像上の画素の座標から実空間の座標 (x,z) への変換パラメータを求めた。

4.2 インパルス力の作用と変位の計測

ボイスコイルモータはストローク 10mm で、ドライバにより電流制御をした。力を作用する部分についてはマーカが押し棒によって隠されてしまうことから、レーザー変位計によりボイスコイルモータの変位計測を行うこととした。ビデオカメラにより、240Hz でスロー録画を行った。その時の画像を図 4 に示す。

ボイスコイルモータをドライバにより電流制御した。最初 0.08A でストロークが最も縮んだ状態にしておいて、その後計測開始と同時に最大定電流である 1.5A の電流を流し、下向きに力を加えるようにした。それを 8.3ms 電流を流した後、今度は 1.5A の電流をを逆向きに流して上向きに力が出るように調整した。8.3ms はモータのストロークを最大限に生かせるように試行錯誤して決めた値である。マーカの撮影では、照明を正面、左右の三方向から当てる事によりマーカの暗さを際立たせるようにした。撮影後、カメラの画像をパソコンに取り込んで、各画像に対して、適切な閾値を試行錯誤の未決定し 2 値化を行いその重心を求めることで画像上のマーカの座標を求め、それに上述の座標変換を施すことで実空間の (x,z) の座標値を計算した。画像処理の様子を図 5 に示す。

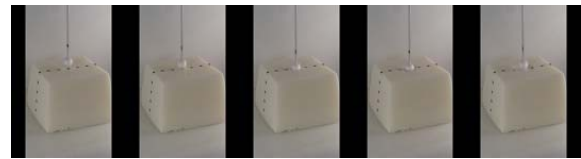


図 4 実際のゼリーの変形の様子

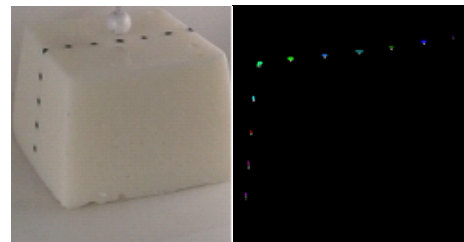


図 5 画像処理の様子

4.3 変位と対象物からのインパルスのな力の結果

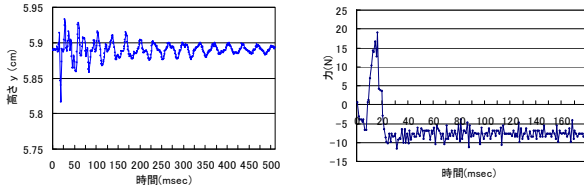


図 6 (左図) マーカの z 座標の時間変化
(右図) F_{jelly} として求まる力の時間変化

左図のマーカの変位に関しては振動後の減衰の様子が現れており、少しノイズが見られるものの明らかに減衰振動を示している。

右図の F_{jelly} として求まる力はゼリーがボイスコイルモータの芯に接着された棒の先から離れると 0 となるはずである。よって、それ以降で負として検出された値はモータのストロークが最小の時モータ自身から発せられる抗力だと考えられるので、ゼリーからの力としての計測が有効なのは 20ms までである。よって右図を 0ms から 20ms までの積分した値がゼリーからモータに加えられた力と考えられる。

4.4 デコンボリューション

4.3 で求めたインパルスのな力はやはり幅のある連続的な力であり、その力によって表れてきた応答というのはインパルス応答が畳み込まれた出てきた応答だということができる。そこでそのたたみこまれた応答から元の単位インパルス当たりの応答を求める事をデコンボリューションという。

まず、インパルス応答 $h(t)$ を持つシステムに任意の信号 $x(t)$ を入力した時の出力 $y(t)$ は次式のたたみ込み積分 (convolution integral) で表される。

$$y(t) = h(t) * x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\lambda) * x(t - \lambda) d\lambda \quad (3)$$

ここで逆に $x(t), y(t)$ が現在分かっているので、 $h(t)$ が求まる事となる。実際にデコンボリューションを施す前後の比較を図 7 に示す。

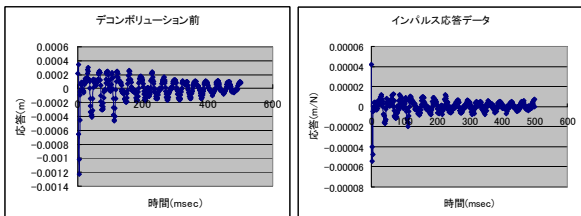


図 7 デコンボリューション前後の比較(左が処理前)

4.5 平滑化

インパルス応答データが求まったらそのデータを適用して実際に仮想空間上の物体を触ってみたいことを考える。しかし、インパルス応答変形モデルの再生システムにおいて再生を安定させるためには、波形にノイズが混じっていると困難な事がわかった。そこで、求めたインパルス応答データに対してノイズ除去の処理を行う事を考えた。ノイズ除去には様々

な方法があるが、ここでは、データの扱いやすさと実際に再生システム上で稼動するかの両面から 3/5 から考えて移動平均による平滑化の手法をとった。移動平均は平均する点数が増えると元の波形を崩してしまう可能性があるため、再生可能である範囲でできるだけ少ない点数である 5 点による移動平均を考えた。その移動平均の式を (4) に示す。また、3 点による移動平均と 5 点による移動平均の比較を図 6 に示す。

図 8 を見ると実際に元の波形をほとんど崩していない事がわかる。

$$y \rightarrow \frac{y_{i-2} + y_{i-1} + y_i + y_{i+1} + y_{i+2}}{5} \quad (4)$$

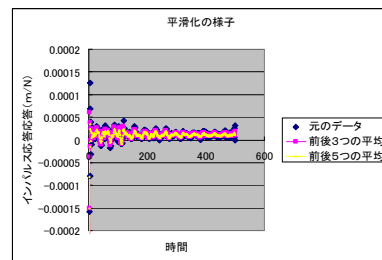


図 8 平滑化の様子

5. 再生実験

5.1 再生システム

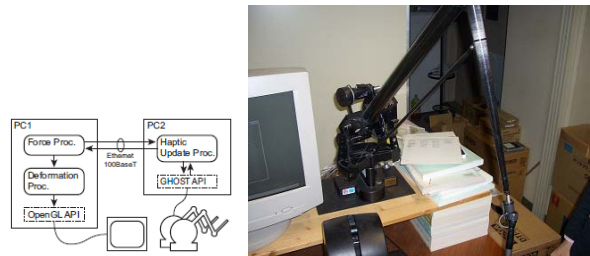


図 9 再生システムと PHANToM

再生システムは図 9 の左図のようなシステムである。PC2 台と力覚提示デバイスとして PHANToM を用いている。PHANToM から力覚提示を受け、もう片方の PC のモニターでは変形インタラクションの画像をリアルタイムで見える事になる。

5.2 再生結果

次に仮想空間上のゼリーに対する再生の様子を図 9 に示す。また、動的な変形の様子を拡大して図 10 に示す。

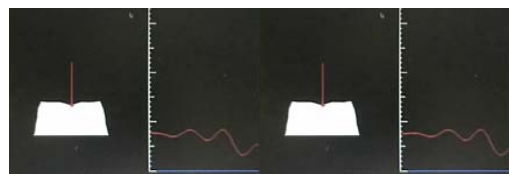


図 9 仮想空間上のゼリーに対する再生結果例

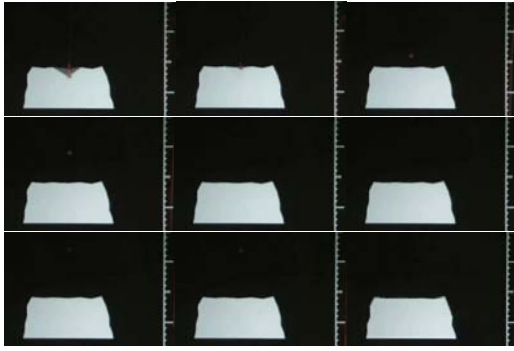


図 10 ゼリーの動的変形例

図 9, 10 の様に 3 節で計測したインパルス応答データを用いて、再生システムにて再生する事が可能となった。図 8 の左がリアルタイムに変形する仮想空間上の物体の様子。右が対象物体から反力として受ける力である。図 9 はゼリーの動的変形の様子を拡大して 4msec ごとに示したものである。

5.3 被験者による評価実験

次に被験者を用いた再生の評価実験をした。評価項目は実対象物のゼリーと仮想空間上の物体を両方触ってもらい力覚と変形において比較させて類似性を主観評価させた。被験者は男性 10 人を用いた。

	ゼリーの感 触について	仮想空間上のゼリ ーの感触について		実物と仮想物体 の感触比較	実物と仮想物体 の変形比較
柔らかい	6	0	よく似てた	2	6
普通	2	4	少しは似てた	6	4
硬い	2	6	あまり似てなかった	2	0

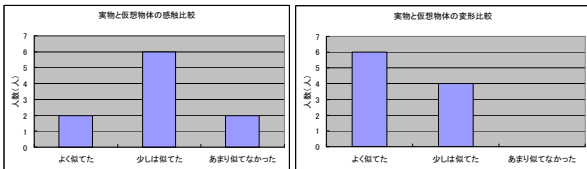


表 1 被験者によるアンケート結果

表 1 のアンケート結果から判断すると、実際のゼリーを触ったときと、仮想空間上のゼリーを触ったときを比較した所、力覚に関しては完全に似ているとは被験者は感じなかった。変形に関しては似ていると感じたといえる。力覚の差異に関しては、計測誤差の他に力覚提示デバイス自体の慣性力の影響に起因すると考えられる。

6. 結言

本研究では、実物体にたいする計測に基づいてインパルス応答変形モデルを生成する手法について検討した。実対象物体に対してインパルスの力を与える手法を提案し、その際の実対象物体からの反力と対象物体の変形を計測する手法を確立した。これらの計測結果からインパルス応答を求め、ノイズ除去を施すことにより実際に再生する事が可能なインパルス応答変形モデルを得ることができた。このモデ

ルを用いた再生結果について被験者を用いた評価実験を行い、実物体と仮想空間上の物体を比較して主観的にある程度の類似の触感を得る事に成功していることを確認した。2 節で述べた様にインパルス応答変形モデルは柔らかさの表現の中でこれまで難しかった接触時のリアルタイムの力覚インタラクションと対象物体全体の動的変形をマクロに記述することの両方を可能にする手法である。この手法の利点は記録再生型のモデルを用いていることであり、潜在的には実対象物に対する計測に基づくモデルの構築の可能性が指摘されていた。本研究は、この計測に基づくモデル構築の手法とプロセスを明らかにしたもので、いわばイメージベースレンダリングにおいて撮影システムを開発したことに相当する。この成果は、やわらかさの触力覚提示に基礎と応用の両面で影響をあたえられられる。基礎的な側面とは現実感の高い触覚表現の追求である。従来の有限要素法などによるモデル化とは異なる変形パターンのレベルでのモデル化により、正確な物理モデルの構築が難しい実対象物を、現実と高度な整合をもって表現する可能性についての検討が期待される。一方、応用的な側面とはやわらかさの表現の積極的な利用である。対象物から手軽に触力覚モデルを得ることができる「撮影システム」が構築できれば、すでに比較的安価に市販されている力覚提示デバイスなどを利用してやわらかさを含む触力覚情報の配信なども可能になると期待される。

今後の課題として、現在は平面上を動いているという仮定のもとで計測したが、ビデオカメラの台数を 2 台にして、3 次元の動きを計測する必要がある。また、多様な変形操作に対する再生を可能にするために斜めから押した時の応答を記録し、各自由度ごとに再構成したデータを得る事が考えられる。

参考文献

- [1] P. Wellman and R. D. Howe : "Towards realistic vibrotactile display in virtual environments", Proc. ASME DSCD, DSC-vol57.2, pp. 713-718, 1995.
- [2] 古賀敏之、廣瀬通孝、広田光一：柔らかさの計測・伝達・再生システムの構築, ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp. 697-698, 2002.
- [3] A. E. Kerdok and S. M. Cotin and M. P. Ottensmeyer and Dawson: "Truth Cube: Establishing Physical Standards for Real Time Soft Tissue Simulation", MedicalImageAnalysis, vol7, pp. 283-291, 2006.
- [4] Kazuyoshi Tagawa and Koichi Hirota and Michitaka Hirose : "Impulse Response Deformation Model: An approach to Haptic Interaction with Dynamically Deformable Object", Proc. Haptics Symposium 2006, pp. 209-215, 2006

