



打撃感提示のための物理モデルによる衝突振動の再現 - 剛性パラメータを反映した振動生成と硬軟感の評価 -

Reproduction of Collision Vibrations Based on Physical Models for Presenting Impact Sensation
- Evaluation of Perceived Stiffness with Generated Vibrations Reflecting Stiffness Parameters -

高橋洋一郎¹⁾, 昆陽雅司¹⁾, 田所諭¹⁾

Yoichiro TAKAHASHI, Masashi KONYO, and Satoshi TADOKORO

1) 東北大学 大学院情報科学研究科 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01 機械系共同棟 413, takahashi.yoichiro@rm.is.tohoku.ac.jp)

概要: ヒトはツールを対象物に衝突させたときの振動情報から対象物の材質感を知覚することができる。筆者らはこれまでに衝突時の振動を人工的に生成するために、接触理論と振動の共振モデルに基づくリアルタイム波形生成モデルを開発した。本研究では、スネアドラムを叩いたときにドラムスティックに発生する振動に着目し、接触モデル中の剛性パラメータを変更することで対象物体の硬軟感を再現できることを実証する。知覚された硬軟感をマグニチュード推定法により測定した結果、モデル中で設定したヤング率に対応して硬軟感が誘発できることが確認された。

キーワード: 衝突振動, 物理モデル, 打撃感, 硬軟感, ヤング率

1. 緒言

触覚提示技術において、ロボティクス、ヒューマンインタフェース、そしてバーチャルリアリティといった幅広い分野に対し、振動刺激を用いた研究が数多く報告されている。中でも、物体との衝突を振動でユーザに提示する研究もいくつか報告されている。例えば、A.Okamuraらは、物体の衝突時の振動を減衰振動波によってモデリングすることで、衝突させる対象物体の素材感の再現を実現し [1], 衝突振動の再現により材質感を知覚可能であることを示した。また、著者らの研究グループではユーザの掌から手首、肘にかけて伝播する振動を保存、再生することによって衝突感の臨場感が向上することを示し [2], 現象の再現性の高さを確認している。

しかし、記録ベースの再現手法の課題として、現象の再現には逐一データを計測する必要があることが挙げられる。筆者らは物理モデルに基づき衝突振動をモデル化し、物理パラメータの変更で任意の打撃感を生成する手法を検討してきた。これまで、対象物体の硬さや打撃速度を物性として考慮した物理モデルの実時間再生する手法を提案し、対象物体の硬さをヤング率の値として任意に設定し、それを反映した振動波形を生成できることを示した [3]。一方、物理モデル中のヤング率が、実際に知覚される硬軟感に反映されるかどうかの検証は行われていなかった。これまで、硬軟感に関する研究として、東らは指先でのタッピング動作における動的な硬さとそれを知覚してヒトが推定する硬さとの関係を検証することで知覚に周波数の依存性があることが示されているが [4], 物理モデルに基づく振動刺激で硬

軟感提示と振動波形の関係について調査された例は報告されていない。

本稿では、先行研究で開発した手法を用いて、モデル中のヤング率と、生成される振動波形、および知覚された硬軟感の関係について調査を行う。

2. 先行研究で開発した波形生成モデル

先行研究で著者らは打撃時の衝突速度を入力として、衝突した物体それぞれの素材の硬さをヤング率として定義し、物体を介して伝播していく振動をモデリングする手法を開発した [3]。このシステムの特徴として、硬さや衝突速度をパラメータとして持ち、対象物体の物性を考慮したモデルであることが挙げられる。このモデリングは主に2つの行程で構成されており、それらを順に述べていく。

2.1 反力の推定

はじめに、物体同士の衝突によって他方の物体に生じる反力 F_{re} を求める。物体同士の接触による力 F_{re} は、接触理論から以下の式 (1) に表すことができる。なお、このモデルには平面をもつ物体に対して球面を持つ物体で衝突させた場合を想定している。

$$F_{re} = \frac{4}{3} E^* R^{\frac{1}{2}} d^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

E^* : 合成ヤング率, R : 球面半径, d : 物体の変位

式 (1) の関係と物体同士の接触中のエネルギー損失を考慮し、運動方程式は式 (2) のように得ることができる。

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + C \frac{dy}{dt} + \frac{4}{3} E^* R^{\frac{1}{2}} y^{\frac{3}{2}} - mg = 0 \quad (2)$$

このとき、 m は把持物体の質量、 y は把持物体の変位、 R は球の半径、 g は重力加速度、 C はエネルギー散逸量、 α は反発の減衰係数を決定する係数で二物体のヤング率、ポアソン比や球の半径、そして衝突中の物体速度等から決定される。そして、 E^* は二物体のヤング率とポアソン比から決まる定数を表す。

ここで、対象物体のヤング率を変化させた場合での反力を以下の図 1 に示す。

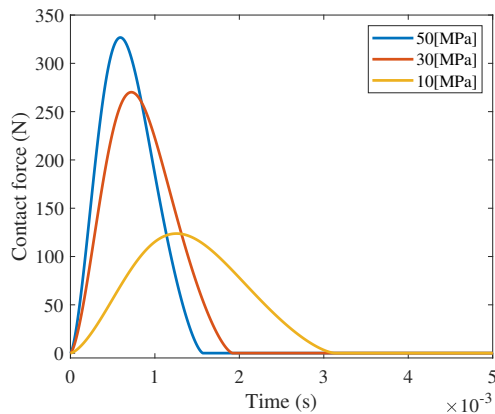


図 1: Waveform of Contact force

図 1 よりヤング率の値によって反力が変化し、ヤング率が反映されていることがわかる。

以上の行程より、式 (2) を変位について解き、運動方程式に代入することによって接触中の反力を求める。

2.2 反力を強制力とした強制振動

次の行程として、式 (2) で得られた反力によって振動が発生しユーザに伝播する過程を考える。式 (2) で得られた反力 F を強制力とした強制振動は次の式 (3) のように記述できる。

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = F \quad \left(f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{k}} \right) \quad (3)$$

f : 共振モード周波数

減衰率と共振モード周波数に関しては、実際の打撃する事象において手元に伝播する振動を測定し算出する他、任意の対象を仮定して係数を決定する。

2.3 実時間処理について

2.1 節及び 2.2 節における微分方程式に関して、微分方程式の解の算出は 4 次のルンゲクッタ法によって算出する。また、変位の初期値は 0.0 m と定義した。まず、入力された衝突速度を式 (2) に代入し、把持物体の変位 y について解いた結果から反力を算出する。次に、式 (2) から得られた反力を式 (3) の外力の項へ代入し、振動の変位 y について解いた値を出力とした。また、本システムの処理のサンプリングレートは 48000 Hz として、再生用 USB オーディオからの再生にも対応させている。出力データ点数に関しては、オーディオバッファを 512 サンプルとして全データを 4096 サンプル出力させるように設定した。

3. 実験

本実験では、打撃対象の剛性パラメータであるヤング率を変化させ、知覚された硬軟感をマグニチュード推定法により計測した。なお、[3] と同様にスネアドラムを打撃した際のドラムスティックに発生する振動を対象として、物理パラメータを同定し、推定されたスネアドラムのヤング率を基準に、値を増減することにより、硬軟感の変化を検証した。

3.1 提示刺激と実験の行程

まず、実験環境について説明する。実験には視覚刺激として VR を用い、映像は Unity によって構築されたドラムセットに正対した視点がヘッドマウントディスプレイ (HTC VIVE, HTC, 以下 HMD) によって提示される。VR 空間内には視点の前方に基準刺激用と比較刺激提示用のドラム 2 台及びスティック型のオブジェクトが配置されており、図 2 に示す VR トラッカや IMU センサが搭載された振動提示デバイスを使用することで VR 内のスティックを任意の位置に操作できる。

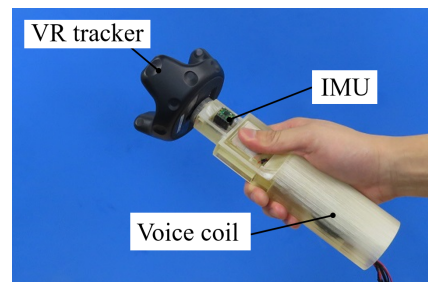


図 2: Developed Haptic Handle

振動刺激は VR 空間内のスティックでドラムを打撃し、振り下ろされたスティックがドラムに衝突したタイミングでデバイスから提示される。基準刺激としては、ヤング率 2.1 MPa で生成された振動刺激を基準に採用した。また、図 3 と図 4 はそれぞれ基準との比較で提示する 0.21 MPa, 0.63 MPa, 1.05 MPa, 1.47 MPa, 1.89 MPa, 4.20 MPa, 8.40 MPa, 12.6 MPa, 16.8 MPa, 21.0 MPa の計 10 種類のヤング率を用いて生成された反力と振動波形である。この実験で提示する振動刺激に関しては、振幅の大きさで硬軟感が評価されるのを避けるため、同じ速度で打撃した際には同じ初期振幅の振動波形が出るようにゲイン調整を行っている。また、刺激提示にはボイスコイルアクチュエータ (アークラブ・ラボ、Vp210) を用いた。

次に、実験の行程について述べる。被験者は図 5 に示すように着座の状態で行い、評価中はイヤホンからホワイトノイズを流し聴覚情報を遮断した状態で行った。視野前方の 2 台のドラムの内、左前方に配置したドラムを打撃すると常に基準となるヤング率 2.1 MPa での振動刺激が、もう一方を打撃すると先の 10 種類のいずれかのヤング率で生成された振動刺激がランダムに提示される。被験者には全 10 種類それぞれについて 2 回ずつ合計 20 回において、基準値 10 で知覚した硬さと比べ、比較刺激がどの程度の硬さであるかを数値で回答した。

本実験の参加者は、著者を除いた健康状態の男女 10 名 (22~25 歳) であり、本実験における振動刺激の順番や提示方法、刺激に関する情報は知らされていない状態で行われた。

3.2 結果と考察

図 6 は、知覚された硬さと提示したヤング率の関係を示している。データは全 10 人分の実験データの幾何平均である。また、グラフ上の近似関数はスティーブンスの法則に基づき、 $M = kY^b$ と定義した指数関数に近似され、 M は知覚された硬さ、 Y は提示したヤング率、 k 及び b は比例定数であり、値はそれぞれ k が 0.371, b が 0.226 となった。

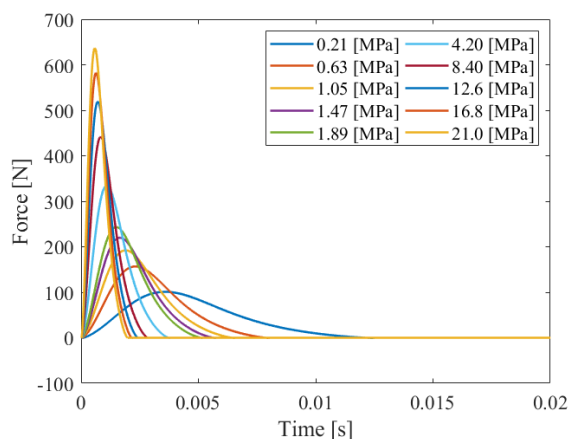


図 3: Waveform of Force between 10 Young's modulus

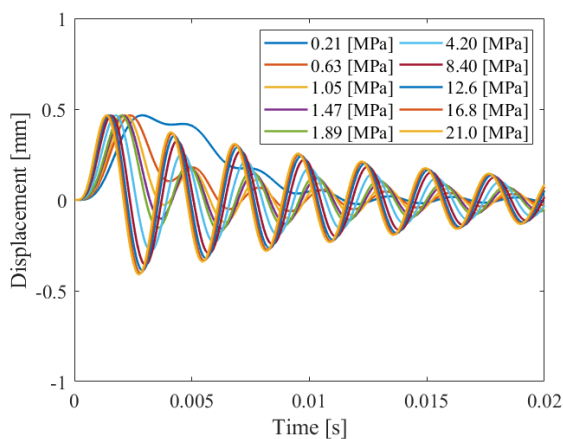


図 4: Waveform of vibration corresponding to Young's modulus at the same impact velocity

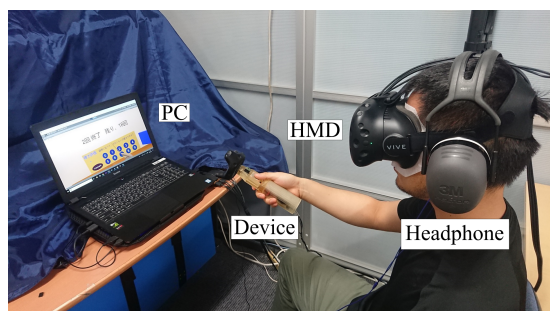


図 5: Overview of Experiment

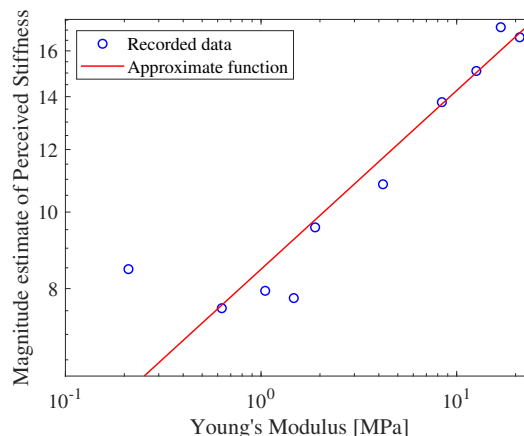


図 6: Magnitude estimate of Young's modulus

実験結果から、データ全体の傾向として指数関数的に増加する傾向が確認された。このことから、ヤング率を増加させると被験者の知覚する硬軟感も単調に増加する傾向が確認された。以上により、提案する物理モデルで設定したヤング率に対応して硬軟感が誘発できることが確認された。

4. 結言

本稿では、先行研究で開発した物理モデルに基づく衝突感提示手法に関して、硬軟感を表現できているかの検証を行った。VR 上のドラムに応用し、対象物体の剛性パラメータであるヤング率を変化させたとき、その硬さがどのように被験者が知覚するかをマグニチュード推定法により測定した。結果として、ヤング率の上昇とともに被験者の知覚が指数関数的に単調に増加することが確認され、提示したヤング率に対してそれに対応した硬さの知覚を触覚刺激によって被験者に提示できていることが確認された。

今後は、高次の振動モードに対しても同様の知覚を与えるられるか検証する。

参考文献

- [1] Allison, M., Mark, R. and Jack, T., "Reality-Based Models for Vibration Feedback in Virtual Environments", IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, vol.6, No.3, 2001.
- [2] 坂田 峻也, 昆陽 雅司, 田所 諭, "テニスの打撃感を伝える触感提示手法の提案: 第 1 報: 実測値を基にした振動刺激の生成と評価", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2A1-A08, 2015.
- [3] 高橋 洋一郎, 昆陽 雅司, 田所 諭, "打撃感提示のための物理モデルに基づく衝突振動の実時間生成", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 1P2-U03, 2019.
- [4] Kosuke Higashi, Shogo Okamoto, Yoji Yamada, Hikaru Nagano, and Masashi Konyo, "Hardness perception based on dynamic stiffness in tapping", frontiers in Psychology, vol.9, article 2654, 2019.