

生体組織の反力再現を目指した力覚の拡張現実感呈示

Haptic Augmented Reality to Present Force Response of Biological Tissue

○栗田 雄一, 大塚 紘之

Yuichi Kurita

Hiroyuki Otsuka

広島大学

Hiroshima University

kurita@bsys.hiroshima-u.ac.jp

永田 和之

Kazuyuki Nagata

産業技術総合研究所

National Institute of Advanced

Industrial Science and Technology

池田 篤俊 小笠原 司

Atsutoshi Ikeda

Tsukasa Ogasawara

奈良先端科学技術

大学院大学

Nara Institute of

Science and Technology

Abstract:

Haptic devices are one of promising interfaces as human-computer interaction tools that provides users further information in virtual reality environment. The proposed haptic augmented reality (haptic AR) can present the force response of a visco-elastic object by combining the force generated from a haptic device against the force response generated from the base object, which has similar visco-elastic property to that of the target object. In this paper, the concept of the haptic AR device is described. The frequency characteristics are analyzed by the system identification and human experiments show the proposed method has a better performance than a device-only method.

1 はじめに

システムからの情報を人により直感的に伝えるための次世代インタフェースがもつべき機能の一つとして、力覚情報の呈示技術が提案されて久しい。実際、テレマニピュレーション [1], リハビリ [2], 医療用シミュレータ [3] など、反力応答を再現できるハプティックデバイスのニーズは高いが、粘弾性など複雑な応答を含む反力を精度良くモデル化するのは難しく計算量を必要とする上、それを呈示するには高性能なデバイスが要求されることから、全体としてコストが高くなる問題がある。そこで我々は、低スペックな力覚デバイスを使ってリアリティの高い反力応答を実現するための手法として、力覚の拡張現実感呈示 (Haptic Augmented Reality) [4, 5, 6] を利用することを提案している。キーとなるポイントは、再現する対象に似た物体特性をもつ補助物体を用意し、これにハプティックデバイスから生成された力を重畳することにある (Fig. 1)。これにより、(1) モデル化がしきれない、またはデバイスでは再現しきれない力覚応答を補助物体がカバーすることでリアルな力覚感を呈示できる、(2) 部分的に硬く/柔らかくするなどの反力応答の操作が可能、といった利点が得られる。

本論文では提案する力覚の拡張現実感呈示手法の概要について説明し、ARX モデル (Auto Regressive eXogenous model) によるシステム同定によりから生成された反力応答の応答性を解析した結果を報告する。また被験者実験により、提案手法の有効性の評価を行った結果を説明する。

2 力覚の拡張現実感呈示手法の概要

デバイスが出力する反力を F_{device} 、補助物体が発生させる反力を F_{base} とすると、本手法により人が感じる反力の合計 F_{human} は

$$F_{human} = F_{device} + F_{base} \quad (1)$$

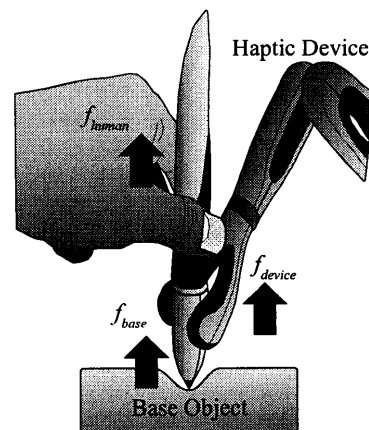


Fig. 1: Concept of Haptic Augmented Reality

で表される。なお補助物体を用いずにデバイスのみを用いて反力を再現しようとした場合、 $F_{base} = 0$ となる。

本稿では反力のモデルとして、押し込み変位からのみ決定される次の式を使用する。

$$F_{device} = a_1 x^3 + a_2 x^2 + a_3 x \quad (2)$$

すなわち、このモデルではバネ成分である弾性のみでモデル化され、粘性や慣性などは考慮されない。

ここで物体として、Soft (オスカーC 硬度0), Medium (同5), Hard (同15) の3種類のウレタンゲル (エクシールコーポレーション, 人肌ゲル) を用意し、これらの静的反力応答ならびに動的反力応答を Fig. 2 に示すシステムにより計測した。実験システムは6軸力センサ (BLオートテック, Nano25) ならびにポテンショメータ (COPAL, JCL300B5k0.5) を取り付けたアーム型ハプティック

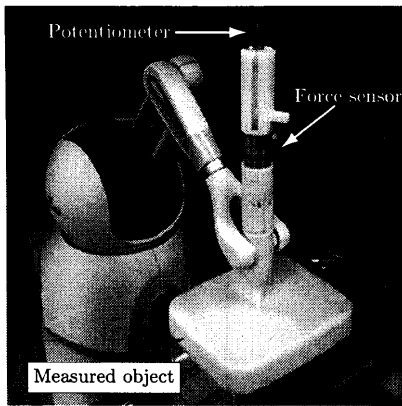
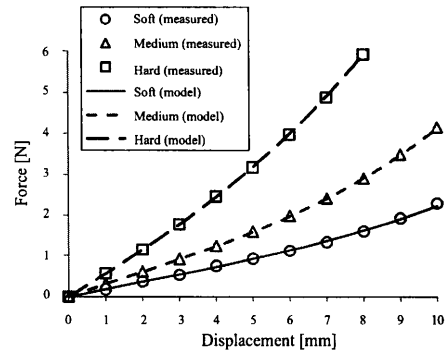


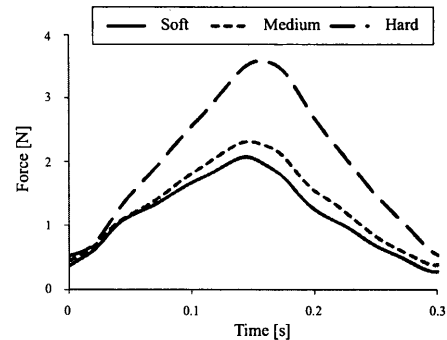
Fig. 2: Overview of the experimental system

デバイス (SensAble, PHANTOM Omni) を直動ロボット (YAMAHA Motor, F10) によって駆動する構成となっている。Fig. 3 (a) の○, △, □点はハプティックデバイスのペン先を徐々にゲルに押し込んだときの静的反力の実測値を示しており、それぞれのゲルの硬さが異なることが分かる。これら3種類のゲルをEq. 2に示したモデルを使ってそれぞれ近似した結果が同図上の線であり、弾性成分だけでも静的反力の特性を良く再現できていることがわかる。このときのそれぞれのゲルに対するパラメータをTable 1に示す。次にFig. 3 (b)はペン先を4 [mm]の深さまで30 [mm/s]の速さで上げ下げしたときの反力応答を示している。この図からは、立ち上がりの応答が静的条件で計測されたものと異なる、ヒステリシスが観察されるなど、これらゲルが剛性だけでは表現できない性質を有していることを意味している。このことから、Eq. 2のモデルでは動的条件下においてはその反力応答を正確に再現できないことが示唆される。

しかしここで適切な補助物体を活用することにより、Eq. 2のような簡単な反力モデルでも目標に近い反力応答を再現することができる。ここではMediumのゲルの反力応答を再現目標に設定することを考えよう。これを(1)目標の反力応答をEq. 2でモデル化したものをデバイスが出力する(すなわち、補助物体は用いない)、(2)補助物体を用いて、目標反力と補助物体の持つ反力との差をEq. 2でモデル化し、これをデバイスが出力する、の2条件で実験を行った。なお(2)の補助物体を使う条件では、目標物体よりも柔らかい補助物体を使うケース(Soft)と、硬い補助物体を使うケース(Hard)の2種類の実験を行った。補助物体が対象より柔らかいケースでは、目標反力を発生させるためには補助物体の反力だけでは足りないためにデバイスが押し込み方向の力を抑制するような制御がされる一方、補助物体が対象より硬いケースでは、目標反力よりも補助物体自身も持つ反力が強いためにデバイスは押し込みの力を加速するような制御が行われる点に注意されたい。この条件で先の動的実験同様、ペン先を4 [mm]の深さまで30 [mm/s]の速さで上げ下げさせたときの反力応答を計測した結果がFig. 4である。この図から、目標物体の反力応答(Target)に最も近い反力応答を示したのは提案手法のうちSoftの補助物体を用いた条件(soft)であることがわかる。デバイスのみの条件(Device only)では目標反力に届いておらず、また力覚重畳を行う提案手法でも補助物体が硬いケース(hard)では逆に大きすぎる反力が出力されている。ここで重要なのは、いずれのケースでもデバイスからの反力はEq. 2で示した式でモデル化されている点である。このことは適切な補助物体を選択することで、剛性しか考慮しないモデルでも対象の反力応答に近い力覚を呈示することが可能になることを意味している。



(a) Static reaction force profile



(b) Dynamic reaction force profile

Fig. 3: Reaction force profile of the objects

3 生成された反力の周波数応答解析

Fig. 4は反力応答の時系列信号の一例を示したが、提案手法により対象物の反力応答をどれだけ再現できているのかを評価するため、それぞれの手法で再現した反力応答の周波数応答特性を調べる。ここでは(1)デバイスのみで反力呈示した場合、(2-a)Softの補助物体に加えてデバイスで反力呈示した場合、(2-b)Hardの補助物体に加えてデバイスで反力呈示した場合、の3つのケースにおいて周波数応答解析を行った。解析手順は次の通りである。

1. システムにステップ入力を与え、その応答(位置と力)を計測する
2. ARXモデルによりシステム同定する
3. システム同定結果から周波数応答特性の比較を行う

ステップ入力はデバイスのペン先を5 [mm]上方から落下させることで発生させる。ハプティックデバイスは、そのペン先が一定位置より下がるとEq. 2に示したモデルに基づき距離に応じた反力を発生させるようになっており、これを力センサにより計測した。またそのときの位置の変化もポテンシオメータにより計測した。力、位置のサンプリングレートはいずれも1k [Hz]である。計測した目標物体(Target)、デバイスのみ(Device only)、補助物体

Table 1: Parameter of the static force models

Object	a_1	a_2	a_3
Soft	2.9×10^{-4}	-3.2×10^{-2}	4.1×10^{-1}
Medium	4.0×10^{-3}	-3.7×10^{-2}	6.1×10^{-1}
Hard	5.0×10^{-3}	-4.3×10^{-2}	9.7×10^{-1}

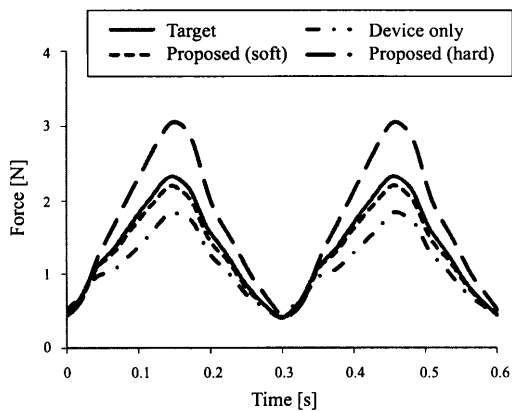


Fig. 4: Reaction force generated by the proposed method

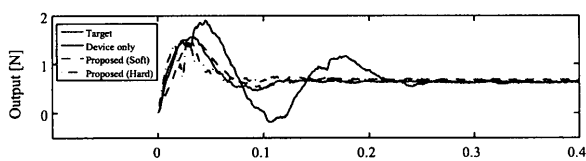


Fig. 5: Reaction force response

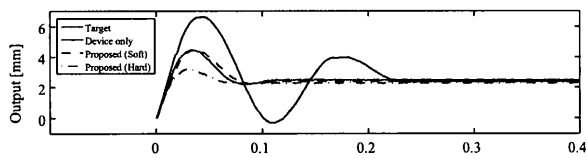


Fig. 6: Reaction displacement response

Soft + デバイス (Proposed soft), 補助物体 Hard + デバイス (Proposed hard) のそれぞれの反力応答と位置の応答を Fig. 5 および Fig. 6 に示す。

次に得られた応答を Fig. 7 に示される ARX モデルでシステム同定する。ARX モデルはシステムの入力信号 $u(t)$, 入力信号 $u(t)$, 白色雑音 $w(t)$ によってシステムをモデル化する手法であり, むだ時間 n_k を考慮すると次式でモデル化される。

$$A(q)y(t) = B(q)u(t - n_k) + w(t) \quad (3)$$

これによって同定したシステムから, ゲイン応答と位相応答を求めた。反力の周波数特性を Fig. 8, 位置の周波数特性を Fig. 9 に示す。デバイスのみを用いた場合, 5 - 10 [Hz] 近傍で振動が発生しているのが確認できる。また補助物体を利用する提案手法でも, 補助物体として Soft を使うか Hard を使うかでその応答は大きく異なっている。これはデバイスの制御特性の違いが影響しているものと考えられる。すなわち, 先に述べたように Soft のケースではデバイスが押し込み方向の力を抑制するような制御をする一方, Hard ではデバイスは押し込みの力を加速するような制御が行われる。このことから利用するハプティックデバイスの制御特性などの影響が力と位置の周波数特性の違いを産み出したものと考えられる。このような周波数特性による評価からも, 今回用いたシステム構成においては, Soft の補助物体を用いて力覚重畳するケースが最も目標物体の特性に近い応答を呈示できるが分かった。

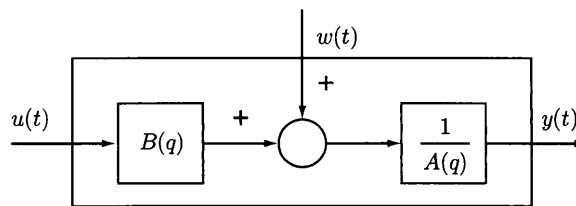


Fig. 7: Block diagram of the ARX model

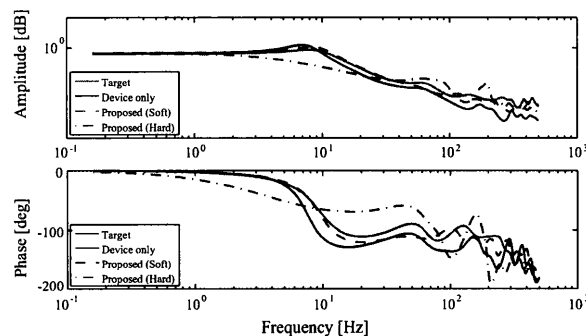


Fig. 8: Frequency response of reaction force

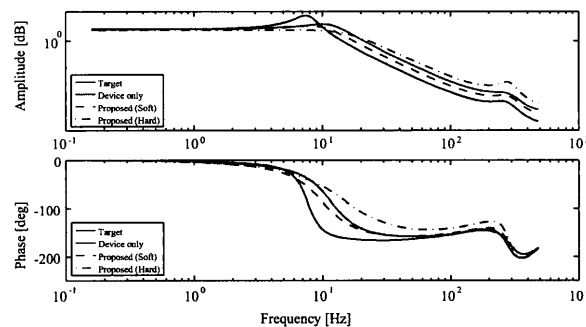


Fig. 9: Frequency response of reaction displacement

4 被験者実験による提案手法の評価

前章までに説明した手法を実際に被験者に体験してもらい, 主観的に目標に近い反力を呈示できているのか検証した。実験では目標をこれまで同様 Medium のゲルとし, この反力応答を (1) デバイスのみで反力呈示した場合, (2-a) Soft の補助物体に加えてデバイスで反力呈示した場合, (2-b) Hard の補助物体に加えてデバイスで反力呈示した場合, のそれぞれで呈示した。

実験は 20 代の健康な男性 11 名により行われ, 実験内容について説明した上で同意を得て実施された。Fig. 10 に実験の様子を示す。被験者はデバイスのペン先上部を右手で把持した状態でピンクノイズが流されたヘッドフォンを装着することでデバイス駆動の有無が聴覚からは分からないようにしている。この状態で図中右側の目標物体と, 左側の目隠しされた反力呈示エリアにおいて 10 [mm] 程度の押し下げ動作を行い, このとき反力呈示エリアで呈示された反力が目標物体の反力とどれくらい近いと感じたかを, Table 2 に示す”似ている (1 点)” ~ ”似ていない (5 点)” の間から一つ選んで回答することを指示される。実験では, 上記の 3 条件に目標物体と同一の物体を置く条件を加え, あわせて 4 種類の呈示条件をランダムに 3 回ずつ呈示し

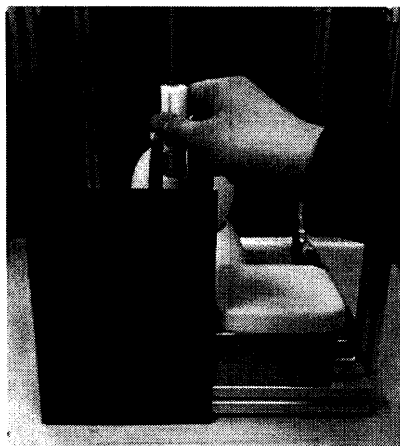


Fig. 10: Human experiment

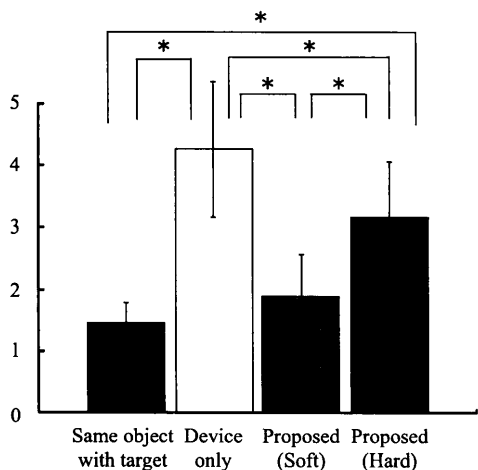


Fig. 11: Average evaluation value of each method. (Target is Medium gel.)

$\alpha = 0.05$

た。なお実験では被験者は回答の確信がもてるまで何度でも左右の押し込みをすることが許されている。

回答結果の全被験者の平均と標準偏差を Fig. 11 に示す。回答が 1 に近いほど被験者は目標物体に近いと感じたことを意味しており、目標と同一物体が呈示されたケースが最も評価が良く、続いて Soft 補助物体を用いた提案手法、Hard 補助物体を用いた提案手法、最後にデバイスのみを使った条件の順の評価となった。またノンパラメトリック多重検定である SteelDwass 法による検定結果を行った結果、デバイスのみで反力呈示した条件は他の全ての条件に対して危険率 5% で有意差が検出された。この結果から、適切な補助物体を用いる力覚重畳技術を用いることにより、単純な反力応答モデルでもより目標に近い力覚を被験者に呈示できることが確認された。

5 おわりに

本研究では再現する対象に似た物体特性をもつ補助物体にハプティックデバイスからの力覚を重畳することで、低コストかつリアル/バーチャルな反力応答を呈示できる、力覚の拡張現実感提示手法を提案した。また ARX モデルに

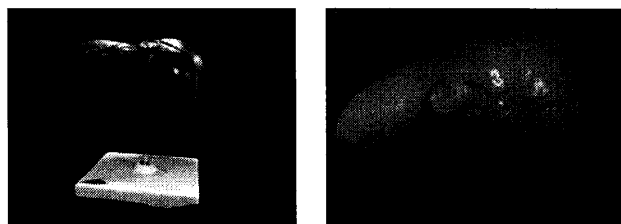


Fig. 12: Liver models for a medical simulator

よるシステム同定から周波数応答性を評価し、適切な補助物体を選定することにより、単純な反力応答モデルでも目標に近い反力が呈示できることを確認し、被験者実験による主観評価でも同様の評価が得られた。

本研究は医療シミュレータなどへの応用を見越した生体組織の反力再現を目指しており、Fig. 12 に示すような模擬臓器の構築にも取り組んでいる。今後は臓器等の力覚特性の計測や臓器の反力応答再現に適した補助物体の選定などの課題にも取り組んでいく。

参考文献

- [1] Yasuyoshi Yokokohji, Nobuhiko Muramori, Yuji Sato, and Tsuneo Yoshikawa. Designing an encountered-type haptic display for multiple fingertip contacts based on the observation of human grasping behavior. *International Journal of Robotics Research*, 24(9):717-729, 2005.
- [2] 小柳健一, 古荘純次, 中西和彦, 笠潮, 竹中重和, 井上昭夫. 三次元上肢リハビリ訓練システムの開発第 3 報: vr 技術とその臨床予備試験を通じた検討. *日本ロボット学会誌*, 27(1):79-86, 2009.
- [3] 藤野翔平, 小林輝, 佐藤大祐, 内山勝. 生体軟組織の切断操作感覚を提示するマイクロ剪刀型ハプティックデバイスの開発. *日本ロボット学会誌*, 26(1):82-89, 2008.
- [4] 永田和之, 多田充徳, 貴田恭旭, 岩崎英文. ハプティックレコーダの開発 第 1 報: 基本システムの開発. In *計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会*, pages 103-1, 2006.
- [5] 永田和之, 多田充徳, 貴田恭旭, 岩崎英文. ハプティックレコーダの開発 第 2 報: 実測に基づく仮想物体モデルの構築. In *計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会*, pages 1A1-6, 2007.
- [6] S. Jeon and S. Choi. Modulating real object stiffness for haptic augmented reality. In *EuroHaprics*, pages 609-618, 2008.

Table 2: Feeling and evaluation value

感覚	点
似ている	1
少し似ている	2
どちらとも言えない	3
あまり似ていない	4
似ていない	5