



# 実物体とのインタラクションにおける 手首への力覚の重畳提示

Superimposed Presentation of Force Sense on the Wrist in Interaction with a Real Object

成宮 正隆<sup>1)</sup>, 堀江新<sup>2)</sup>, 稲見昌彦<sup>3)</sup>

Masataka NARUMIYA, Arata HORIE, and Masahiko INAMI

- 1) 東京大学 工学部計数工学科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, narumiya-masataka474@g.ecc.u-tokyo.ac.jp)
- 2) 東京大学 工学系研究科先端学際工学専攻 (113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, arata.horie@star.rcast.u-tokyo.ac.jp)
- 3) 東京大学 先端科学技術研究センター (〒 153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1, drinami@star.rcast.u-tokyo.ac.jp)

**概要:** 近年の AR システムは視覚情報の重畳提示が代表的であり, 他のモーダルに対する適用例は少ない. 本研究では力触覚に着目し, 手首への力覚提示を用いた力覚の重畳提示手法を提案する. 手法の効果を検証するため, 実物体を把持した状態で力覚提示を行う実験を行い, 実物体のサイズの知覚に与える影響を調査した. その結果, 手首への力覚提示によって, 人のサイズへの知覚が変化する一方で, 影響された結果に知覚されるサイズの大小には, 実物体そのもののサイズが重要であることがわかった.

**キーワード:** 感覚・知覚, 拡張・複合現実, ウェアラブル, AR 力覚

## 1. はじめに

我々は普段から物に触れ, 力を受けることで環境の物体を知覚している. 道具を始めとした物体の操作の能力などにも力触覚は大きく寄与しており, 我々にとって欠かせない感覚の一つであることは明らかである. このような背景から近年は VR 技術として, 力触覚提示の研究が数多くなされている.

VR 技術として力触覚提示が注目されている一方で, AR に対して力触覚提示が適用されている例は少ない. 近年普及している AR システムは視覚情報に CG を重畳して提示するものが代表的である. 一方で Azuma[1]によると, AR とは 1) Combines real and Virtual(現実と Virtual の重ね合わせである), 2) Interactive in real time(実時間で動作する応答性を備えている), 3) Registered in 3-D(3 次元的に整合性が取れているものである) という特徴を持つものであり, 視覚に限ったシステムではない. そこで, 「視覚の AR」と同様に考え, 「力触覚の AR」を実物体から受ける力触覚に Virtual な力触覚を重畳して提示して現実を拡張する手法と定義すると, 上述した力触覚の感覚としての重要性から, AR における力触覚を提供することには, 高いポテンシャルがあると考えられる. 普遍的な物体に対して, 力触覚的特徴をソフトウェア的に編集可能な形で付与することで, これまでに無い新たなインタラクションが AR に生まれることが期待できる.

力触覚の AR を提示するためには人と実物体とのインタラクションを妨げることなく Virtual な力触覚を提示することが必要である. 先行研究としては, Ando らの Smartfinger[2]

や Maurizio Maisto らの指第二関節に装着するデバイス [3] などがある. しかし, これらは, 指腹部がデバイスに接触しているため, 実物体とのインタラクションを阻害しうることや, 指先にデバイスを装着するシステムとなっているため, インタラクションのあるものが物体との接触面積が指先より大きな実物体の場合, 力覚を重畳して提示することが困難であるという課題がある.

そこで本研究では上述した課題を解決する力覚の AR システムとして, Virtual な力覚提示を手首へ行うことで, 実物体由来の力覚に Virtual な力覚を重畳する手法を提案する. 手首に力覚提示デバイスを装着すると, 実物体とのインタラクションを阻害する可能性が少なくなり, また, 接触面積が手の平サイズ程度の実物体とのインタラクションを行う場合でも, 力覚を重畳して提示することが可能になる. さらに, 深部感覚である腱などにも力がかかっており, 手首への力覚提示で, 実物体から人へと付与される力覚が表現可能であるとも考えられるためである. そして, 本稿では, 実験を通して手首への Virtual な力覚を実物体から生じる力覚と重畳させて提示することで, 力の知覚に影響を与えることを検証する.

## 2. 手法

本実験では, 人がある実物体を把持した際に, 手首へ Virtual 力覚刺激を提示することで, 人が手首で知覚するモーメントを変化させ, 実物体を把持する際に生じるのモーメント知覚を制御する. そして, このことによって, 実物体のサイズや質量密度に対する知覚を変化させるという AR 力覚シ

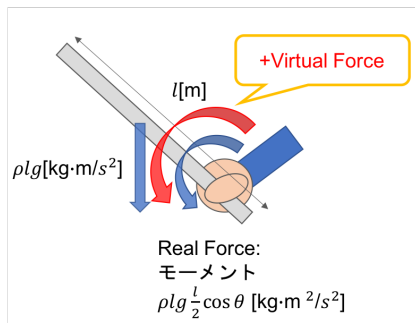


図 1: システムで想定する棒を把持する力学モデル

システムを取り扱う。

例として、棒を把持している際に、棒の長さ知覚を変化させる場合を考える。この時、棒を図 1 のように棒を持つ力学系をモデル化すると、棒を把持している手は棒の長さと同質量密度に比例したモーメントを受ける。この時に感じるモーメントに加え、力学提示デバイスを用いて手首に力を付与することで、Virtual モーメントを付与して、把持している人に棒の長さを長く知覚させるということである。

システム構成は図 2 のようになる。すなわち、AR 力覚システムでは、人が実物体を把持した時、実物体は人に対して、実物体のサイズと同質量密度に応じた力覚を与える。同時に、実物体からの力覚提示に重畳する形で、所望の力学提示になるよう計算機ソフトウェアから力覚提示デバイスに制御信号を送り、それを用いてデバイスは Virtual な力覚をユーザーに与える。また、この時、Virtual 視覚によって把持している物体のサイズを変化させる視覚刺激システムも併用することで AR 力覚システムの効果を向上させる。

### 3. 実験

#### 3.1 目的

本実験での目的は、あるサイズの金属棒を把持するとき、手首への提示する力覚が、人の知覚する棒のサイズに影響を及ぼすのかを明らかにし、また、人の知覚に影響を及ぼすのであれば、デバイスの出力と変化したサイズ知覚の量的な関係を確認することである。

#### 3.2 参加者

参加者は 20 代の男性 4 人を対象にして行なった。

#### 3.3 装置

前章で述べたシステムのうち、計算機は MSI GT62VR 7RE-249CA Dominator Pro(Micro-Star International Co., Ltd.) を、シミュレーション・制御ソフトウェアは Unity(Unity Technologies) を、手首装着型力覚提示デバイスは EXOS Wrist DK2(exiii) を、視覚提示デバイスは HMD、特に HTC Vive(HTC Corporation) を、実物体として金属棒を用いた。(図 3) また、人の位置情報を取得には、HTC 99HALM005-00 Vive Tracker(HTC Corporation) を HTC Vive と用いた。手のローテーションを測定には、EXOS Wrist DK2 が力覚提示に加え、手のピッチ角・ヨー角を測定できることを用いた。



図 3: 実際に用いた長さの異なる棒 (黒いテープを巻いた棒が基準刺激で用いたもので、白いテープの巻いた棒が比較刺激で用いたもの)

#### 3.4 刺激

本実験では、表 1 に列挙した条件を各レイヤーごとに組み合わせを変更しながら、各々の条件セットごとに実験を行う。例えば、実際の棒の長さ、提示する力覚の強さを  $(x_1, f_{2+})$  を 1 条件セットにするなどである。今回の条件として用いた値は、実際にもつ棒の長さとして  $(x_0, x_1, x_2) = (0.6, 0.8, 1.0)$  [m]、提示する力覚の強さとしては  $(f_{2-}, f_{1-}, f_0, f_{1+}, f_{2+}) = (-24, -12, 0, 12, 24)$  [N] を用いた。なお、鉛直上向きを正、鉛直下向きを負にしている。

後ほど詳しく述べるが、本実験では基準刺激と比較刺激を被験者に提示し、被験者はその 2 つの刺激を比較することとなる。実験の際はこの中の一つの条件セットを基準刺激として、基準刺激で選んだ条件セットも含めどれか一つの条件セットを比較刺激として提示することになる。今回、基準刺激としては、 $(x_1, f_0)$  の条件セットを用いた。

表 1: 刺激条件を各レイヤーで列挙したもの

条件変数	条件値
実際に持つ棒の長さ [m]	$x_0, x_1, x_2$
提示する力覚の強さ	$f_{2-}, f_{1-}, f_0, f_{1+}, f_{2+}$

#### 3.5 手順

実験は以下の手順を踏んで行われる。

被験者は HMD と手首への力覚提示デバイスを装着し、特定の長さの金属棒の端を把持する。その際、金属棒のユーザーが持つのと逆の端をモーター駆動式の台の上に乗せておく。また、この時、被験者には、HMD でユーザーの手の位置と同じ位置に CG で用意した手と、それに握られているある長さの金属棒の CG を表示させた視覚刺激を提示する。力覚提示デバイスからは一切 Virtual 力覚は提示しない。

そして、実験者がボタンを押すと、台が棒の端から外れ、CG 金属棒の長さが伸び、2.0[m] の長さで 3 秒間静止する。

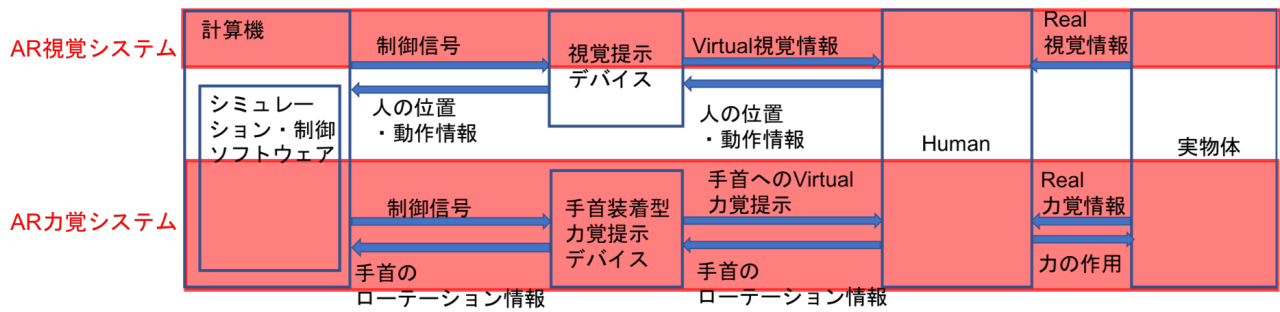


図2: 実物体とのインタラクションに基づいたAR視覚・力覚システム



図4: 実際にデバイスを装着した状態で棒を把持した様子

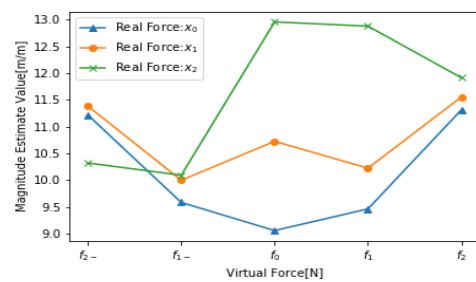


図5: 提示した力覚の強さと回答した感覚評価量の幾何平均との関係

3秒経過後、再び縮んで元の長さのものに戻るという視覚提示が行われる。また、それと同時に、力覚提示デバイスからCGの金属棒に同調する形でVirtual力覚として提示され、視覚提示されている棒の長さが元に戻ると出力が0となるように力覚刺激を行う。この時、Virtual視覚刺激での最大の棒の長さ、提示する力覚の強さは条件セットによって異なる。被験者は、実験者によって、順に標準刺激ののち比較刺激を提示される。最後に、被験者は、手順2で提示された基準刺激で知覚した棒の長さを10とした時の、比較刺激で知覚された棒の長さを、基準刺激との対比で答える。例えば、基準刺激で知覚した棒の長さが比較刺激で知覚した棒の長さより少し長いと感じられたら12と答えるなどである。これを被験者1人につき比較刺激の条件セットを変えながら何回か試行する。条件セットを全て試すので試行回数は被験者1人につき45回である。なお、はじめに、タスクに慣れるため、5回のテスト試行を行なったのちに実験を開始するものとした。

### 3.6 結果

マグニチュード推定法で得られる感覚評価の代表値としては、通常、中央値と幾何平均が用いられる.[4]それに習い、感覚評価の結果を条件セットごとにまとめ、幾何平均と中央値を算出した。(図5, 6)実際に把持した棒の長さが $x_0, x_1$ の時、幾何平均と中央値共に、 $f_0$ を軸として対称性のある傾向が見られる。棒の長さが $x_0$ の時は提示される力覚の大きさに比例する形で知覚する長さが大きくなり、 $x_1$ の時は、 $f_1, f_{1-}$ の時は知覚するあまり変化せず、 $f_2, f_{2-}$ の時に長く知覚する傾向がある。また、実際に把持した棒の長さが $x_2$

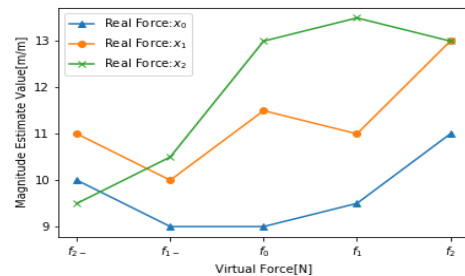


図6: 提示した力覚の強さと回答した感覚評価量の中央値との関係

の場合では、鉛直下向きに力覚提示した時は短く知覚する傾向がある。

感覚評価量としての回答は最大値20から最小値7までであり様々な感覚評価量が回答されていた。(図7, 8)実際に把持

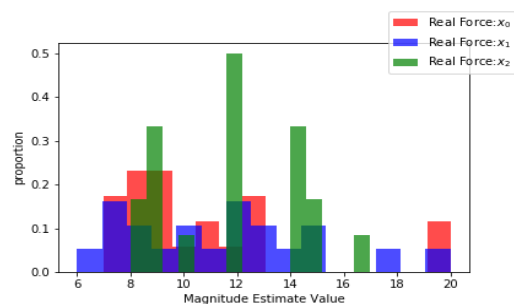


図7: 回答した感覚評価量のヒストグラム

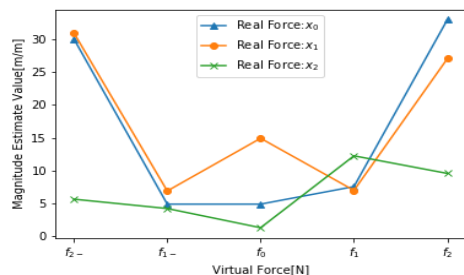


図 8: 提示した力覚の強さと回答した感覚評価量の不偏分散との関係

する棒の長さが  $x_0, x_1$  では、力覚提示の大きさが大きいと明確に分散が大きくなる傾向が見られる。対症的に、 $x_2$  の場合は、全体的にかなり分散が小さい。実際に、自由度 (19,19) で F 検定をしたところ、 $x_0, x_1$  間での p 値は約 0.98 であった一方、 $x_0, x_2$  間では約 0.12、 $x_1, x_2$  間では約 0.11 と、棄却域を 10% とすると棄却はされないものの、 $x_0, x_1$  間と比較してとても小さな値となった。

#### 4. 考察

まず、不偏分散を見ると、実際に把持する棒の長さが  $x_0, x_1$  の時は、提示する力覚の強さに応じて不偏分散が大きくなる傾向がある一方で、棒の長さが  $x_2$  の時は比較的分散が小さくなっている。したがって、実際に把持する棒の長さが  $x_2$  程度の長さ以上だと、 $f_{2-}$  から  $f_2$  [N] の範囲の力覚提示では、棒の長さの知覚に対して与えられる影響がより小さくなっていると考えられる。

幾何平均や中央値を見ると、実際に把持する棒の長さが  $x_0, x_1$  の場合は、提示される力覚の向きに関わらず、提示される力覚の大きさにしたがって知覚する長さが長くなる傾向がある。 $x_0$  と  $x_1$  でのグラフの形の違いは、棒の長さによって長さの知覚に影響を及ぼすために提示すべき力覚の強さが違うことが要因だと推測される。すなわち、実際にもつ棒の長さが長いほど、その長さへ影響を与えるために強い力覚を提示しなければならないためであると考えられる。また、把持する棒の長さが  $x_2$  の場合、鉛直上向きの力覚提示に対して知覚する長さはほとんど変化せず、鉛直下向きの力覚提示を行うと短く知覚される傾向にあった。上述したように、本実験で用いた力覚の強さの範囲では、 $x_2=1.2m$  の棒のサイズへの長さ知覚へ影響を与えるための力覚強度が足りなかったと考えられるが、その一方で、 $x_2$  の時に鉛直下向きの力覚提示をした際の幾何平均や中央値を見ると、短く感じられる傾向がある。これは、サイズのある閾値を持って、提示する力覚の強さと知覚するサイズの関係が大きく変化することが示唆されている。そして、力覚提示の値で見ると、提示する力覚が  $f_2, f_{2-}$  の強度であると、不偏分散は大きくなりつつも、幾何平均なら 11.5 と 10.8 あたりに、中央値なら 12 と 10.5 あたりに値が集まっているように見える。これは、一部の人が、バンドから受ける力が強い条件では、実物体から手のひらに受ける力よりもバンドからの力による皮

膚感覚に知覚が引っ張られている（実物体の長さを無視し始める）可能性がありえる。そして、一部の人は  $f_0, f_1, f_{1-}$  の時と同様に感覚評価をしているため、そこにギャップが生まれることで分散が大きくなった可能性が考えられる。

#### 5. 結論と今後の展望

本稿では、視覚における AR と同様に、力触覚における AR を「現実の力触覚情報と Virtual の力触覚情報の重ね合わせ」と定義した上で、Virtual な実物体から発生する力覚との重畳を手首への力覚提示によって行う AR システムを提案し、その効果を検証した。検証実験の結果、手首への力覚提示によって、人のサイズへの知覚が変化することが確認できた。特に、サイズに対する知覚に影響を与える際には、実物体のサイズが重要となり、サイズがある一定以内であると、小さく知覚させる効果は弱いですが、物体を大きく知覚させる効果が大きいことが確認できた。一方、サイズがある一定以上を越えると、重畳する Virtual な力覚が逆効果となり、サイズを大きく知覚させようとする力覚を提示した際に、物体を小さく知覚させる可能性が示唆された。

今後の展望として、提示する力覚の強度が極端に大きい場合や、実物体サイズが大きい時に力覚提示によって小さくさせる効果の有効範囲の調査をすることで、サイズ知覚と手首への力覚提示強度の関係をモデルとして提示することが考えられる。また、本稿は、実物体を棒に限定したが、形状によっても Virtual な力覚が与える影響は変化しうると推測できるため、サイズ知覚と力覚提示の実物体の形状による関係の調査することも考えられる。その上で、力覚の AR を表現しうる AR システムを再構築することで、フィードバックのあるシステムを構築することが可能と考えられる。

#### 参考文献

- [1] Ronald T. Azuma : A Survey of Augmented Reality, Teleoperators and Virtual Environments, Vol. 6, No. 4, pp. 355-385, 1997.
- [2] Hideyuki Ando, Takeshi Miki, Masahiko Inami, Taro Maeda: Smartfinger: Nail-mounted tactile display, Association for Computing Machinery, Inc, ACM SIGGRAPH 2002 Conference Abstracts and Applications, SIGGRAPH 2002, p. 78, 2002.
- [3] Maurizio Maisto, Claudio Pacchierotti, Francesco Chinello, Gionata Salvietti, Alessandro De Luca, Domenico Prattichizzo : Evaluation of Wearable Haptic Systems for the Fingers in Augmented Reality Applications, IEEE TRANSACTIONS ON HAPTICS, VOL. 10, NO. 4, pp.511-522, 2017.
- [4] 中谷和夫 : 感覚尺度構成法, 講座心理学 2, 東京大学出版, pp.141-172, 1997.